



VIII Научно–практическая  
конференция

**ВОДОРОДНАЯ МАЁВКА**



**Сборник тезисов**

26–30 апреля, 2026  
п. Мезмай, Россия



**Тезисы докладов**  
**VIII научно-практическая конференция**  
**«Водородная маевка»**  
**26 - 30 апреля 2026 года,**  
**п. Мезмай, Россия**

УДК 662.769.21(08)

ББК 24.121я43

Т 299

Т 299 Тезисы докладов VIII научно-практической конференции «Водородная маевка» 26 - 30 апреля 2026 года, п. Мезмай, Россия. – Новочеркасск: Лик, 2026. – 47 с.

ISBN 978-5-908060-36-3

В сборнике представлены материалы VIII Научно-практической конференции «Водородная маёвка», по следующим направлениям исследований: водородные технологии и водородная энергетика, топливные элементы, электролизеры, проточные редокс-батареи, электрокатализаторы, композиционные материалы, потенциал ИИ в химии и энергетике.

УДК 662.769.21(08)

ББК 24.121я43

ISBN 978-5-908060-36-3

© Авторы, 2026.

**Программа VIII Научно-практической конференции  
"Водородная маевка"  
26 апреля (вс)**

1	14.00-19.00	Заезд, регистрация участников
---	-------------	-------------------------------

**27 апреля (пн)**

1	9.00-9.05	<b>Бринк И.Ю.</b> Приветственное слово
2	9.05-9.50	<b>Золотухина Е.В.</b> «Новые представления о механизме токообразующей реакции на биоанодах микробных топливных элементов»
3	9.50-10.30	<b>Герасимова Е.В.</b> «Особенности механизма медиаторного биоэлектрокатализа с нерастворимым редокс-медиатором и дизайна биоанода»
4	10.30-11.00	<b>Фалина И.В.</b> «Исследование свойств ионообменных мембран различного целевого назначения»
5	11.10-11.30	Кофейная пауза
6	11.30-12.00	<b>Каюмов Р.Р.</b> «Литий- и натрий-проводящие нафтионподобные мембраны для химических источников энергии»
7	12.00-12.30	<b>Шмыглева Л.В.</b> «Плазмохимический синтез порошковых материалов для электрохимических устройств»
8	12.30-13.00	<b>Солдатов М.А.</b> «Спектроскопия рентгеновского поглощения для определения динамики локальной атомной и электронной структуры катализаторов»
9	13.10-13.50	Обед
10	14.00-14.40	<b>Пуха В.Е.</b> «Вакуумные технологии функциональных слоев для твердооксидных топливных элементов»
11	14.40-15.20	<b>Алексеев А.А.</b> «Создание электрокатализаторов для водородной энергетики»
12	15.20-15.40	<b>Канцыпа И.В.</b> «Новый подход к синтезу электрокатализаторов на основе платины и палладия для катода топливных элементов с протонообменной мембраной»
13	15.40-16.00	<b>Беличенко Т.А.</b> «Размерные эффекты в фотоэлектрохимии фотокатализе»
14	16.00-16.20	<b>Кубанова М.С.</b> «Электрохимическое получение дисперсных гидроксидов и оксидов алюминия»
15	16.20-16.30	Кофейная пауза
16	16.30-17.00	<b>Смирнова Н.В.</b> «Фото-, электро- и фотоэлектрокаталитически активные материалы: электрохимический синтез и приложения»
17	17.00-19.00	Постерная сессия

**28 апреля (вт)**

1	9.00-9.30	<b>Бельмесов А.А.</b> «Влияние частоты включения-выключения батарей топливных элементов с открытым катодом на их деградацию»
2	9.30-9.50	<b>Алексеев Д.В.</b> «Производство линейки катализаторов для низкотемпературных топливных элементов»
3	9.50-10.10	<b>Яльмаев А.Б.</b> «Двухслойные анодные каталитические электроды с добавлением диоксида кремния»
4	10.10-10.30	<b>Гаврилова А.А.</b> «Разработка электрокатализаторов для низкотемпературных топливных элементов на основе наночастиц высокоэнтропийного сплава»
5	10.30-10.50	<b>Клименов И.А.</b> «Роль анодной добавки диоксида кремния в оптимизации характеристик низкотемпературных топливных элементов»

6	11.00-11.20	Кофейная пауза
7	11.20-11.40	<b>Бескопыльный Е.Р.</b> «Тестирование катализаторов серии pm в составе мембранно-электродных блоков»
8	11.40-12.00	<b>Галин М.З.</b> «Аспекты эксплуатации батареи водородно-воздушных топливных элементов с открытым катодом»
9	12.00-12.20	<b>Грицай М.А.</b> «Разработка operando ячейки для исследования каталитической активности катализаторов»
10	12.20-12.40	<b>Худолей А.В.</b> «Новый подход к получению анодных PtRu/C катализаторов с высокой активностью в реакции окисления метанола»
11	12.40-13.00	<b>Рожков Я.Д.</b> «Применение искусственного интеллекта для дизайна катализаторов процесса электровосстановления кислорода»
12	13.10-13.50	Обед
13	14.00-14.20	<b>Скляр В.М.</b> «Направленный дизайн одноатомных Fe-N-C катализаторов посредством альтернативных методов сборки прекурсоров»
14	14.20-14.40	<b>Коханов А.А.</b> «Высокотемпературный синтез PtPdCo/C катализаторов для низкотемпературных топливных элементов»
15	14.40-15.00	<b>Колмаков В.Г.</b> «Литий-ионные аккумуляторы для микроспутников на низкой околоземной орбите»
16	15.00-15.20	<b>Криводубский Д.П.</b> «Электрохимические и структурно-морфологические свойства Pt/C электрокатализаторов: роль соотношения (углерод: меламин) при модифицировании углеродного носителя»
17	15.20-16.00	<b>Леонтьев И.Н.</b> Круглый стол «Клуб любителей структурного анализа»
18	16.00-16.30	Кофейная пауза
19	16.30-19.00	Постерная сессия

### 29 апреля (ср)

1	10.00-16.00	Динамическая дискуссия «Проблемы и перспективы реализации проектов в области водородных технологий в России»
2	16.00-17.00	Подведение итогов Конференции

### 30 апреля (чт)

1		Отъезд участников
---	--	-------------------

### Постерные доклады

1	Губанова Александра Алексеевна	Окислительно-восстановительные процессы на Pd-содержащих материалах в присутствии H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>
2	Меньщиков Владислав Сергеевич	Тестирование электрокатализаторов в составе мембранно-электродного блока
3	Ставенчук Элеонора Андреевна	Исследование Ag-содержащих композитов, полученных в условиях импульсного электролиза в составе суперконденсаторов
4	Шкирская Светлана Алексеевна	Исследование селективности гетерогенных катионо- и анионообменных мембран с различным содержанием доли ионообменной смолы
5	Пинаева Екатерина Александровна	Влияние катодного ГДС на мощностные характеристики топливного элемента с открытым катодом
6	Белинский Евгений Виталиевич	Влияние структуры каналов биполярных пластин на тепло- и массоперенос в твердополимерном топливном элементе
7	Мещерякова Екатерина Евгеньевна	Транспортные характеристики гибридных мембран для водородного топливного элемента
8	Бровкина Марина Александровна	Исследование процесса отравления анионообменной мембраны компонентами яблочного сока методом хронопотенциометрии

**ФОТО-, ЭЛЕКТРО- И ФОТОЭЛЕКТРОКАТАЛИТИЧЕСКИ АКТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ: ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ И ПРИЛОЖЕНИЯ**

Смирнова Н.В.

*Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)*

*имени М.И. Платова, Новочеркасск, Россия*

e-mail: smirnova\_nv@mail.ru

Переходные металлы и полупроводниковые оксиды переходных металлов (ОПМ) являются наиболее перспективными кандидатами для разнообразных фото- и фотоэлектрокаталитических применений вследствие их способности создавать фотогенерированные электронно-дырочные пары при освещении светом достаточной энергии, химической стабильности и доступности. В общем случае фото(электро)активность полупроводниковых оксидных материалов определяется размером, структурой, морфологией и дефектностью наночастиц. Для фото- и фотоэлектрокатализаторов важно определить оптимальные структурные характеристики с учетом конкурирующего влияния удельной поверхности и рекомбинации носителей заряда и, таким образом можно повысить каталитические характеристики материалов за счет точной настройки их физических и химических свойств.

Существуют различные методы получения материалов на основе ОПМ, такие как плазменное, химическое осаждение, сольво/гидротермальный и т. д., однако они сложны и предполагают использование токсичных и дорогих реагентов. По сравнению с традиционными методами химического синтеза электрохимический синтез является более экологически безопасным, простым и масштабируемым методом производства высокоэффективных катализаторов. Используя импульсный переменный ток (ПИТ), можно получить наноструктуры с уникальным фазовым составом и заданными свойствами, оптимизированными для фото(электро)каталитических приложений.

Электрохимически синтезированные ОПМ, содержащие Zn, Ti, W и In проявляют хорошие фото(электро)каталитические свойства благодаря их достаточно большой площади поверхности, высокой подвижности электронов, ускоренному переносу электронов и более высокой квантовой эффективности. С другой стороны, ОПМ и их композиты эффективны в качестве материалов для неферментативных электрохимических сенсоров.

Таким образом, электросинтез с использованием импульсного переменного тока имеет большие перспективы для разработки одно- и смешанно-фазных оксидных катализаторов для многофункциональных фото-, электро- и фотоэлектрохимических применений.

**НОВЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О МЕХАНИЗМЕ ТОКООБРАЗУЮЩЕЙ РЕАКЦИИ НА БИОАНОДАХ МИКРОБНЫХ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

Золотухина Е. В., Горьков К.В., Левченко М.Г.

*Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии  
Российской академии наук, Черноголовка, Россия  
e-mail: zolek@icp.ac.ru*

Биотопливные элементы (БТЭ), в частности, микробные топливные элементы (МТЭ), начиная с 60-х годов прошлого века являются интенсивно изучаемой тематикой. Идея использования естественных процессов переработки органических продуктов микроорганизмами, происходящих в природе и уже используемых человеком для переработки отходов многих производств, для получения электроэнергии является весьма привлекательной. В то же время, до сих пор коммерческих систем производства электроэнергии по технологии МТЭ так и не сделано, есть только пилотные установки. В первую очередь, это, конечно, связано со сложностью организации процесса передачи электронов от микроорганизма электроду и низкими мощностями МТЭ (мВт и мкВт с кв.см), пока не окупающими стоимость используемых для изготовления таких источников тока материалов.

Классические представления о работе биоэлектродов в МТЭ основаны на формировании пленки микроорганизмов на поверхности электродов и передачи электронов, формирующихся при ферментативных реакциях окисления органических субстратов в клетках, через внутренние или внешние редокс-активные молекулы (медиаторы) электроду-носителю. В рамках предшествующей серии работ по амперометрическим сенсорам состояния микроорганизмов нами было отмечено, что даже при непосредственном нанесении микроорганизма на электрод возможно определять состояние микроорганизмов по продуктам метаболизма, выделяемым в контактирующий с электродом раствор. Результаты этих работ послужили основой для идеи об альтернативном механизме, ответственном за возникновение тока в МТЭ, - прямом или медиаторном окислении электроактивных продуктов метаболизма микроорганизмов на электроде. Эта идея в [1, 2] была подтверждена экспериментами с культуральными средами, находящимися в контакте и отделенными от клеток микроорганизмов (*E. coli* и *S. cerevisiae* использовались как хорошо изученные классические культуры). Оказалось, что при метаболизме простых или сложных углеводов клетки *E. coli* выделяют жиры, адсорбция которых на электроде приводит к пассивации последнего, а клетки дрожжей вырабатывают во внешнюю среду электроактивные метаболиты - органогидразины, различные соединения с гидрохинонными группами, что и определяет основной амперометрический отклик биоэлектрода [2]. Таким образом, впервые с начала развития МТЭ был предложен альтернативный механизм возникновения токового сигнала, что открывает возможность преодолеть порог развития МТЭ и реализовать идею получения электричества из природных процессов.

*Исследования выполнены в рамках государственного задания ФИЦ ПХФ и МХ РАН (рег.№ ПТНИ 124013000692-4).*

*Литература:*

1. M.O., Lee J., Kim Y.J., Zolotukhina E.V., Koch M. // J. App. Electrochemistry. 2025. V. 55(2). P. 499-508. <https://doi.org/10.1007/s10800-024-02180-2>
2. E. Zolotukhina, K. Gor'kov, M. Dmitrieva, M. Levchenko, Y. Silina. // Bioelectrochemistry. 2026. V. 169. N 109197. <https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2025.109197>

**ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЗМА МЕДИАТОРНОГО БИОЭЛЕКТРОКАТАЛИЗА С НЕРАСТВОРИМЫМ РЕДОКС-МЕДИАТОРОМ И ДИЗАЙНА БИОАНОДА**

Герасимова Е.В., Клейникова С.А., Горьков К.В., Левченко М.Г., Золотухина Е.В.

*Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии  
Российской академии наук, Черноголовка, Россия  
e-mail: zolek@icp.ac.ru*

Биоаноды, в основе работы которых лежит медиаторная биоэлектрохимическая реакция, активно используются в таких устройствах, как биотопливные элементы и биосенсоры. Так, в коммерческих одноразовых тест-полосках, предназначенных для измерения уровня глюкозы в капиллярной крови, в настоящее время наиболее распространена технология биосенсоров второго поколения, основанная на включении редокс-медиатора в активный слой [1]. Механизм медиаторного биоэлектрокатализа схож для обоих устройств: медиатор действует как переносчик электронов от восстановленного глюкозой (аналит, топливо) фермента к электроду. В литературе описаны различные системы редокс-медиаторов – водорастворимых и труднорастворимых, используемые в активных слоях биоанодов. В данном исследовании проведено сравнение двух термодинамически подобных медиаторов – феррицианида калия и ферроцена, отличающихся водорастворимостью и стабильностью по отношению к компонентам активного слоя биоэлектрода. Замена растворимого медиатора на труднорастворимый приводит к изменению сложной многостадийной кинетики биоэлектрохимического процесса на биоаноде с квазигомогенного на гетерогенный, поскольку медиатор и фермент, окисляющий глюкозу, представляют собой разные фазы. В связи с этим труднорастворимые медиаторы практически не используются на практике для биосенсоров глюкозы, так как из-за кинетических затруднений ограничен линейный диапазон обнаружения (ЛДО), увеличено время установления токового отклика и недостаточна чувствительность по сравнению с растворимыми системами. Краткий анализ исследований с использованием ферроцена позволяет сделать вывод о том, что поляризация, ЛДО и время отклика варьируют от одного исследования к другому вместе с конструкцией и составом активного чувствительного слоя. В данной работе впервые обсуждается роль конструктивных особенностей активного слоя, содержащего нерастворимый окислительно-восстановительный медиатор, в реализации биоэлектрохимической реакции; особенности состава такого слоя с ферментом и труднорастворимым медиатором и организации электрода сравнения/противоэлектрода при переходе от трех- к двухэлектродной схеме измерений для сохранения электроаналитических характеристик. Кроме того, в серии модельных экспериментов показано отсутствие влияния на токовые отклики биоанода побочных реакций с кислородом или пероксидом водорода, являющихся участниками биохимической реакции, хотя такое влияние обсуждалось ранее в литературе.

*Исследования выполнены в рамках государственного задания ФИЦ ПХФ и МХ РАН (рег.№ ПТНИ 124013000692-4).*

*Литература:*

1. E.V. Zolotukhina, E.V. Gerasimova, V.V. Sorokin, M.G. Levchenko, A.S. Freiman, Y.E. Silina // *Chemosensors*. 2022. V. 10(8). N 298. DOI: 10.3390/chemosensors10080298

**СОЗДАНИЕ ЭЛЕКТРОКАТАЛИЗАТОРОВ  
ДЛЯ ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ**

Алексеевко А.А.<sup>1</sup>, Беленов С.В.<sup>1,2</sup>, Павлец А.С.<sup>1</sup>, Баян Ю.А.<sup>1</sup>, Панкова Ю.А.<sup>1</sup>,  
Астравух Я.В.<sup>1</sup>, Алексеевко Д.В.<sup>1,2</sup>, Гутерман В.Е.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия*

<sup>2</sup>*ООО «ПРОМЕТЕЙ РД», Ростов-на-Дону, Россия*

e-mail: an-an-alekseenko@yandex.ru

Платиносодержащие электрокатализаторы являются важнейшим компонентом топливных элементов с протонообменной мембраной (ТЭПОМ), обеспечивающим высокую эффективность работы энергоустановки и ее длительный срок службы. Такие материалы представляют собой наночастицы платины или ее сплавов, равномерно распределённые по поверхности углеродного или композитного носителя. К электрокатализаторам для ТЭПОМ предъявляется ряд требований, основными из которых являются повышенная активность и устойчивость к деградации в процессе работы. Особое значение для эффективной работы ТЭПОМ имеет кислородный электрод, поскольку реакция восстановления кислорода (РВК) сопровождается сильной поляризацией электрода. Кроме того, на этом электроде наиболее выражены процессы деградации электрокатализатора. Добиться сочетания высоких значений каталитической активности и стабильности является сложной задачей, поскольку эти параметры антибатно зависят от структурно-морфологических характеристик платиносодержащих электрокатализаторов. На базе лаборатории «Наноструктурные материалы для электрохимической энергетики» Южного федерального университета нашим коллективом успешно реализуются исследования направление на создание электрокатализаторов с заданными характеристиками для топливных элементов и электролизеров с протонообменной мембраной. В своей работе мы используем следующие подходы для повышения активности и стабильности электрокатализаторов:

- 1) получение биметаллических наночастиц для снижения доли контакта платины и углерода и уменьшения вероятности окисления носителя в процессе работы;
- 2) получение катализаторов на основе равноразмерных и равномерно распределенных по поверхности углеродного носителя Pt и PtM (M = Cu, Co, Ni) наночастиц;
- 3) поиск более стабильных углеродных носителей, в качестве которых часто рассматриваются графитизированные или модифицированные углеродные материалы, углеродные нанотрубки или различные виды графена.

На базе опытного производства ООО «ПРОМЕТЕЙ РД» нам удалось наладить получение электрокатализаторов, отличающихся равномерным распределением наночастиц платины по поверхности носителя, характеризующихся повышенными функциональными характеристиками по сравнению с импортными аналогами.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-79-10162 реализуемого в Южном федеральном университете, <https://rscf.ru/project/24-79-10162/>*

## ВАКУУМНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СЛОЕВ ДЛЯ ТВЕРДОКСИДНЫХ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Пуха В.Е., Нечаев Г.В., Лысков Н.В.

*Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии  
Российской академии наук, Черноголовка, Россия  
e-mail: pve@icp.ac.ru*

В докладе на основе собственных исследований демонстрируются возможности формирования функциональных слоев топливных элементов методами физического (ФОВ) и аэрозольного осаждения в вакууме (АОВ).

Для твердого электролита  $Zr_{0,84}Y_{0,16}O_{1,92}$  (YSZ), традиционно используемого в твердооксидных топливных элементах (ТОТЭ), рабочая температура обычно превышает  $850^{\circ}C$ . Такая высокая температура в первую очередь связана с его ионной проводимостью и ограничивает выбор материалов компонентов для формирования ТОТЭ, в которых при длительной эксплуатации возможны процессы химической деградации. Большинство ТОТЭ, которые работают в области высоких температур  $900-1000^{\circ}C$ , не обладают достаточной долговременной стабильностью. Приемлемую скорость деградации в  $0,2\%/1000$  часов [1] сложно достичь, не понижая температуру работы устройства. Чтобы снизить омическое сопротивление и, таким образом, достичь желаемой удельной мощности при более низкой температуре, можно использовать две стратегии: искать электролиты с более высокой ионной проводимостью, либо уменьшить толщину традиционных электролитов на основе YSZ и  $Ce_{0,9}Gd_{0,1}O_{1,95}$  (GDC) [2].

Методы ФОВ (магнетронное и ионно-пучковое распыление) особо привлекательны для формирования очень тонких ( $\sim$ мкм) газоплотных электролитных слоев [3]. Возможности АОВ позволяют формировать практически все функциональные слои ТОТЭ [4]. С другой стороны, для АОВ толщина газоплотного слоя снизу ограничена размером частиц порошка ( $0,2-4$  мкм), из которого осаждается покрытие. Таким образом, мы считаем, что наиболее оптимальным для реализации второй стратегии является совмещение этих двух методов.

Анод-поддерживающий ТОТЭ формировали на спеченной керметной подложке NiO/YSZ = 60/40 масс.%, на которую методом АОВ осаждали мелкозернистый анодный функциональный слой (АФС) NiO/YSZ = 40:60 масс.%. После отжига на АФС методами реактивного ионного распыления металлической мишени осаждали газоплотный слой электролита YSZ толщиной до 10 мкм. Для получения стехиометрии металлических компонент использовали составную мишень из Zr с секторами из Y. Для получения оксидных слоев осаждение проводили при напуске в вакуумную систему смеси  $Ar:O_2=1:1$ . Буферный слой GDC толщиной 2 мкм осаждали методом АОВ. Катодный слой  $La_{0,6}Sr_{0,4}Co_{0,2}Fe_{0,8}O_{3-\delta}$  (толщина  $\sim 20$  мкм) наносили методом трафаретной печати. Методом сканирующей электронной микроскопии исследовали микроструктуру полученного образца. Также были измерены вольтамперные и мощностные характеристики образца ТОТЭ в области рабочих температур  $600-800^{\circ}C$ .

*Электрохимические измерения выполнены в рамках темы государственного задания ФИЦ ПХФ и МХ РАН (номер гос. регистрации 124013000692-4). Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (грант № 25-29-00323).*

1. Golkhatmi S. Z., Asghar M. I., Lund P. D. //Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2022. – Т. 161. – С. 112339.
2. Liang F. et al. //Int. J. Hydrogen Energy. – 2022. – Т. 47. – №. 87. – С. 36926-36952.
3. Lee Y. H. et al. //Nano Letters. – 2020. – Т. 20. – №. 5. – С. 2943-2949.
4. D. Hanft et al. //J. Ceram. Sci. Technol. – 2015. – Т. 6. – №. 3. – С. 147-182.

**ТЕСТИРОВАНИЕ КАТАЛИЗАТОРОВ СЕРИИ РМ В СОСТАВЕ МЕМБРАННО-ЭЛЕКТРОДНЫХ БЛОКОВ**

Бескопыльный Е. Р.<sup>1,2</sup>, Мауэр Д. К.<sup>1,2</sup>, Меньщиков В. С.<sup>1,2</sup>, Алексенко Д. В.<sup>1,2</sup>, Беленов С. В.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Южный Федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия*

<sup>2</sup>*ООО «Прометей РД», Ростов-на-Дону, Россия*

*e-mail: beskopylnyy@sfedu.ru*

Перспективы коммерциализации топливных элементов с протонообменной мембраной связаны со стоимостью и эффективностью работы электрокатализаторов реакции восстановления кислорода (РВК). Эта реакция протекает на катоде мембранно-электродных блоков (МЭБ) топливных элементов и является кинетически затрудненной. В настоящее время наиболее распространенными катализаторами РВК остаются наночастицы платины и ее сплавов, нанесенные на углеродный носитель. Однако их широкое коммерческое применение сдерживается высокой стоимостью, недостаточной каталитической активностью и деградацией в условиях работы топливных элементов.

Данное исследование посвящено изучению эффективности и стабильности работы на катоде МЭБ Pt/C катализаторов с массовой долей платины от 20 до 60% серии «РМ» от российского производителя катализаторов «ООО «ПРОМЕТЕЙ РД».

Нанесение каталитических слоёв на мембрану GORE-SELECT M765.08 проводилось методом трафаретной печати в ФИЦ ПХФ и МХ РАН. Целевое содержание платины на катоде составляло 0.4 мг/см<sup>2</sup>. Сборка МЭБ проводилась методом горячего прессования с использованием газодиффузионного слоя Sigracet 22BV. Активацию МЭБ и измерение поляризационных кривых проводили при температуре 80 °С, относительной влажности 100% и избыточном противодавлении 1.5 бар. Стехиометрические коэффициенты масштабирования потоков водорода и воздуха составляли 2.0 и 2.5 соответственно, минимальный расход – 450 и 850 мл/мин соответственно. Для определения площади электрохимически активной поверхности записывали циклические вольтамперограммы катода при температуре 80 °С, относительной влажности 100% и атмосферном давлении при подаче на анод и катод водорода (200 мл/мин) и аргона (200 мл/мин) соответственно. Циклирование проводили в диапазоне потенциалов 0.05 В – 1.1 В при скорости развертки 50 мВ/с. Ресурсные испытания МЭБ проводились в режиме циклического наложения прямоугольных импульсов 600 и 950 мВ продолжительностью 3 с в течение 30000 циклов при температуре ячейки 80 °С, относительной влажности 100%. На анод МЭБ подавали водород (200 мл/мин), на катод – аргон (75 мл/мин).

Все исследованные катализаторы, за исключением РМ20, демонстрируют схожую начальную производительность на катоде МЭБ. Пониженная производительность МЭБ с катализатором РМ20, вероятно, связана с большей толщиной каталитического слоя, что затрудняет диффузию реагентов и продуктов РВК. Величина начальной ЭХАП снижается в ряду РМ20>РМ30>РМ40. Катализаторы РМ50, РМ60 и РМ40 характеризуются сопоставимыми величинами ЭХАП (38-41 м<sup>2</sup>/г(Pt)). Деградация максимальной мощности в ходе стресс-тестирования МЭБ уменьшается в ряду РМ20>РМ30>РМ40>РМ50. РМ60 демонстрирует схожую с РМ50 степень деградации мощности. Такие различия, вероятно, объясняются степенью деградации ЭХАП, которая уменьшается в ряду: РМ20 > РМ30 = РМ40 > РМ50 = РМ60.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания в сфере научной деятельности № FENW-2026-0007*

УДК 621.352.6

## ДВУХСЛОЙНЫЕ АНОДНЫЕ КАТАЛИТИЧЕСКИЕ ЭЛЕКТРОДЫ С ДОБАВЛЕНИЕМ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ

Яльмаев А.Б.<sup>1,2,3</sup>, Новиков Д.В.<sup>1,2</sup>, Левченко А.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук, Черноголовка, Россия

<sup>2</sup> ООО «Инэнэрджи», Россия 115201, г. Москва

<sup>3</sup> Московский физико-технический институт, 141700 Московская область, г. Долгопрудный  
e-mail: [ialmaev.ab@phystech.edu](mailto:ialmaev.ab@phystech.edu)

Водородно-воздушный топливный элемент – это электрохимическое устройство, преобразующее энергию реакции водорода с кислородом в электричество. Внутренний перенос заряда осуществляется за счет транспорта протонов от анода к катоду. При этом основной перенос протонов осуществляется по сетке водородных связей в водных кластерах в полимере типа «Nafion®» - т.е. внутреннее сопротивление топливного элемента как источника тока во многом определяется содержанием воды, увеличение ее количества приводит увеличению проводимости. Однако избыточное количество воды в каталитических слоях может привести к блокировке подвода газов в зону реакции и снизить токоотдачу. Таким образом эффективность работы топливного элемента в значительной степени определяются балансом воды в каталитических слоях (КС) и мембране [1]. Известно, что при работе топливного элемента происходит осушение анодного каталитического слоя за счет электроосмотического движения воды от анода к катоду и, соответственно снижение эффективности работы топливного элемента. Для повышения эффективности диффузионного возврата воды с катода на анод была предложена концепция двухслойного анодного каталитического слоя, в котором слой, прилегающий к мембране, содержит гидрофильный компонент [2].

В настоящей работе проведено исследование влияния состава анодных каталитических слоев на характеристики топливного элемента в различных условиях эксплуатации. Каталитический материал включал иономер Nafion®, катализатор РМ-40 (ООО «Прометей РД») и диоксид кремния (аэросил 300), который наносили методом трафаретной печати на тефлоновую подложку. Формирование каталитических слоев на мембране осуществляли путем переноса КС с тефлона на мембрану Nafion® NR-211. Электрохимические характеристики каталитических слоев в составе ламинированных мембранно-электродных блоков (МЭБ) исследовали на тестовой станции Greenlight G60 с использованием методов хронопотенциометрии и спектроскопии электрохимического импеданса.

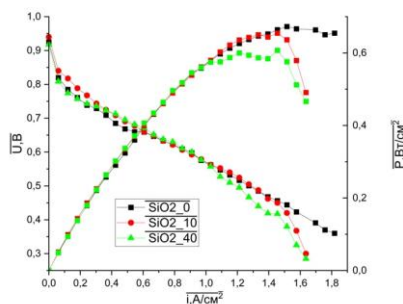


Рисунок 1 Поляризационные кривые образцов при 80 °С,  
RH(H<sub>2</sub>) = 50% RH(Воздух) = 30%, стехиометрия 2/2

Рисунок 2 Суммарное сопротивление контактов и мембраны от напряжения МЭБ, 80 °С, RH(H<sub>2</sub>) = 50%  
RH(Воздух) = 30%, стехиометрия 2/2

Было показано, что введение гидрофильного компонента приводит к снижению внутреннего сопротивления и увеличению удельной мощности топливного элемента в рабочем диапазоне напряжений в условиях низкой влажности подаваемых газов. Что говорит о стабилизации водного транспорта внутри топливного элемента в таких условиях.

Работа выполнена по теме Государственного задания, № государственной регистрации 124013000692-4.

1. Belmesov A.A., Shmygleva L.V., Baranov A.A., Levchenko A.V. // Russ. Chem. Rev. 2024. 93 (6) P. 2.
2. Ney L., Seidl N., Singh R., Schneider P., Stross D., Göppentin A., Tepner S., Klingele M., Keding R. // Fuel Cells. 2024. 6. P. 1.

**РОЛЬ АНОДНОЙ ДОБАВКИ ДИОКСИДА КРЕМНИЯ В ОПТИМИЗАЦИИ ХАРАКТЕРИСТИК НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

Клименов И.А.<sup>1,2</sup>, Бельмесов А.А.<sup>1</sup>, Шмыглева<sup>1</sup> Л.В., Герасимова Е.В.<sup>1</sup>, Галин М.З.<sup>1</sup>, Левченко А.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук, Черноголовка, Россия*

<sup>2</sup>*Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия*  
e-mail: [klimenov.ia@phystech.edu](mailto:klimenov.ia@phystech.edu)

Водородно-воздушные топливные элементы (ТЭ) являются одним из наиболее перспективных технологий «зеленой» энергетики благодаря их высокой эффективности и экологичности. Однако широкое коммерческое внедрение ТЭ затруднено из-за проблем с управлением водным балансом мембранно-электродного блока (МЭБ). Эффективность ТЭ критически зависит от водного баланса между катодом и анодом, определяющего проводимость каталитических слоев (КС) и протонообменной мембраны (ПОМ). Электроосмотический перенос воды на катод вызывает дегидратацию анода и мембраны, увеличивая омические потери. Один из подходов к решению данной проблемы – введение гидрофильных добавок в составные части МЭБ. Поскольку современные коммерческие мембраны (Nafion™ XL, GORE-SELECT®) уже содержат влагоудерживающие компоненты, исследовательский фокус смещается на оптимизацию анодного КС. Известно, что добавка SiO<sub>2</sub> повышает эффективность при пониженной влажности, однако данные получены на немодифицированных мембранах, а его оптимальная концентрация варьируется в двух диапазонах 0.2–0.3 и 0.6–0.8 по отношению к содержанию сажи.

Исходя из всего вышеописанного, данных об оптимальном содержании SiO<sub>2</sub> в анодном КС ТЭ при использовании одновременно модифицированной мембраны недостаточно. Поэтому целью данной работы стало определение оптимального содержания SiO<sub>2</sub> в анодном КС в диапазоне концентраций от 0 до 0.8 при использовании мембраны GORE-SELECT® при различной влажности газов, подаваемых в МЭБ.

Каталитические чернила готовили из HiSPEC 4000 (40% Pt/C) и дисперсии Nafion™ DE-1020 (Nafion/C = 0.8) с использованием планетарной шаровой мельницы. Смесь наносили трафаретной печатью на тефлон, сушили при 120°C, затем переносили на мембрану GORE-SELECT® M735.18 горячим прессованием (130°C, 50 кг/см<sup>2</sup>, 3 мин.). Загрузка платины составила 0.35 мг/см<sup>2</sup> (катод) и 0.25 мг/см<sup>2</sup> (анод). МЭБ с газодиффузионными слоями SIGRACET® 28BC тестировали в ячейке ElectroChem (25 см<sup>2</sup>) на станции GreenLight G60 при 80°C и 1.5 бар по протоколам DOE (100% RH) и EU (50% RH).

Установлено, что добавка SiO<sub>2</sub> равномерно распределяется в структуре анодного КС. При 100% влажности малые концентрации допанта практически не влияют на мощность ТЭ, тогда как высокая доля SiO<sub>2</sub> (0.6–0.8) оказывает негативный эффект. В условиях пониженной влажности (50% RH) оптимальное содержание SiO<sub>2</sub> в диапазоне 0.2–0.4 повышает удельную мощность примерно на 5% за счет оптимизации водного баланса и снижения сопротивления электрохимической реакции.

*Работа выполнена по теме государственного задания Федерального исследовательского центра проблем химической физики и медицинской химии РАН № 125033104607-0.*

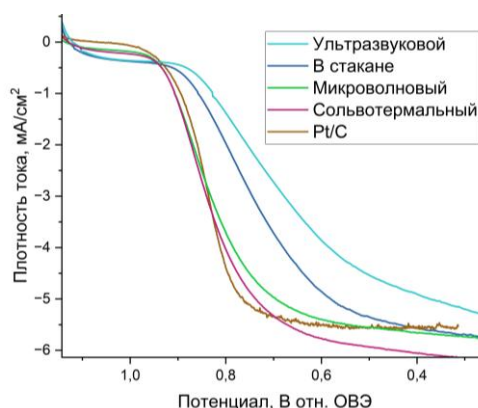
## НАПРАВЛЕННЫЙ ДИЗАЙН ОДНОАТОМНЫХ Fe-N-C КАТАЛИЗАТОРОВ ПОСРЕДСТВОМ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ МЕТОДОВ СБОРКИ ПРЕКУРСОРОВ

Скляр В.М., Грицай М.А., Солдатов М.А.

*Южный федеральный университет, Международный исследовательский центр интеллектуальных материалов, Ростов-на Дону, Россия*

*e-mail: [vsklyarov@sfedu.ru](mailto:vsklyarov@sfedu.ru)*

Электрокатализаторы на основе изолированных атомов железа, закрепленных на азот-допированном углероде (Fe-N-C), рассматриваются как главные кандидаты на замену металлов платиновой группы в катодах топливных элементов [1]. Использование металл-органических каркасов (МОК) в гетерогенном катализе обусловлено их уникальной топологией: они выступают в роли нанореакторов, где высокое содержание азота и развитая система микропор позволяют формировать плотные массивы изолированных активных центров в процессе высокотемпературного отжига. Эффективность реакции восстановления кислорода на таких материалах зависит не только от природы реактивов, но и от условий формирования исходной матричной структуры. Были сопоставлены четыре принципиально разных протокола: классический синтез в стакане, сонохимический, микроволновый и сольвотермальный. Электрохимические измерения (Рис. 1) выявили корреляцию между методом подвода энергии при синтезе и итоговой каталитической активностью.



*Рис. 1. Линейные вольтамперограммы ORR для синтезированной серии Fe-N-C катализаторов (0.1 М KOH, насыщенный O<sub>2</sub>).*

Сольвотермальные и микроволновые катализаторы демонстрируют наиболее крутой наклон кинетической кривой и смещение потенциала полувольты в анодную область, что свидетельствует об ускоренной кинетике ORR. Наблюдаемые эффекты указывают на то, что использование повышенных температур и давлений на стадии нуклеации MOF является более предпочтительной стратегией для создания высокоэффективных каталитических систем, чем методы механического или акустического диспергирования при нормальных условиях.

*Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 25-42-00116) в Южном федеральном университете.*

1. Primbs M. et al. Establishing reactivity descriptors for platinum group metal-free Fe-N-C catalysts... // Energy Environ. Sci. 2020. V. 13. P. 2480.

## РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОКАТАЛИЗАТОРОВ ДЛЯ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ТОПЛИНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ НАНОЧАСТИЦ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНОГО СПЛАВА

Гаврилова А. А., Невельская А. К., Мауэр Д. К., Коханов А. А., Беленов С. В.

*Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия*

*e-mail: agavrilo@sfedu.ru*

На данный момент большинство исследований в области разработок катализаторов для низкотемпературных топливных элементов (НТЭ) и электролизеров с протоннообменной мембраной сосредоточены на поиске способов повышения их каталитической активности и стабильности, а также снижения их стоимости [1].

Использование наночастиц высокоэнтропийных сплавов (ВЭС) на основе металлов платиновой группы, нанесенных на углеродные материалы, является перспективным направлением улучшения характеристик электрокатализаторов. Такие системы содержат пять или более металлических компонентов с одинаковым типом кристаллической структуры и близкими параметрами решетки в эквимоллярных соотношениях, которые образуют структуру твердого гомогенного раствора. Благодаря высокоэнтропийному эффекту, наличию множества различных активных центров и эффектам деформации на поверхности наночастиц ВЭС, такие системы являются перспективными для применения в разных областях, в том числе в катализе [2]. Разработка материалов на основе ВЭС позволяет не только снизить стоимость катализатора, но и уменьшить зависимость от дефицитных металлов.

Однако синтез таких систем ВЭС на углеродном носителе и подтверждение формирования их структуры является сложной задачей, требующей комплексного подхода и различных методов синтеза [3].

В данном исследовании были получены катализаторы на основе наночастиц ВЭС состава PtPdCoNiCu, нанесенных на углеродный носитель Vulcan XC-72, методами жидкофазного и высокотемпературного синтеза. В качестве восстановителей в жидкофазных синтезах были выбраны этиленгликоль (полиольный метод), формальдегид (формальдегидный метод) и тетрагидробората натрия (боргидридный метод).

Полученные материалы характеризуются содержанием металлов до 40 % (благородных металлов до 25 %) и составом наночастиц близким к эквимоллярному. По данным рентгенофазового анализа размер кристаллитов, рассчитанный по формуле Шеррера, составил от 2.2 до 5.5 нм в зависимости от метода синтеза. Дальнейшее исследование структуры полученных материалов методом просвечивающей электронной микроскопии подтверждает формирование равномерно распределенных по углеродному носителю металлических наночастиц со средним размером от 3.7 до 6.3 нм.

Электрокатализаторы на основе наночастиц PtPdCoNiCu демонстрируют высокую электрохимически активную площадь поверхности – до 72 м<sup>2</sup>/г(МПП), а также масс-активность в реакции восстановления кислорода (до 300 А/г(МПП)), что делает их перспективными для использования в технологиях водородной энергетики.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ (проект № 25-79-20045).*

*Место реализации проекта Южный федеральный университет.*

1. G. Xu, L. Yang, J. Li, C. Liu, W. Xing, J. Zhu // *Advanced Sensor and Energy Materials*. 2023. V. 2. P. 100058.
2. X. Zhao, H. Chen, X. Chen, Q. Zhang, C. Li, J. Xie, N. Marinkovic, L. Ma, J.-C. Zheng, K. Sasaki // *J. Am. Chem. Soc.* 2024. V. 146. Is. 5. P. 3010–3022.
3. A. Ahmad, A. Nairan, Z. Feng, R. Zheng, Y. Bai, U. Khan, J. Gao // *Small*. 2024. V. 20. P. 2311929.

**ВЛИЯНИЕ ЧАСТОТЫ ВКЛЮЧЕНИЯ-ВЫКЛЮЧЕНИЯ БАТАРЕЙ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ОТКРЫТЫМ КАТОДОМ НА ИХ ДЕГРАДАЦИЮ**

Бельмесов А. А., Галин М.З., Герасимова Е.В., Шмыглева Л.В., Левченко А.В.

*Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии  
Российской академии наук, Черноголовка, Россия  
e-mail: a.a.belmesov@icp.ac.ru*

Топливные элементы с воздушным охлаждением и открытым катодом (ТЭ) рассматриваются как перспективный класс электрохимических источников тока. В настоящее время начата их опытная эксплуатация в составе различных мобильных устройств, включая носимую электронику и беспилотные летательные аппараты. Однако расширение областей применения ТЭ сдерживается недостатком экспериментальных данных о ресурсных характеристиках и степени влияния эксплуатационных факторов на скорость их деградации.

Известно, что одним из критических факторов, ускоряющих деградацию, является циклирование в режиме «старт–стоп», которое неизбежно сопровождает реальную эксплуатацию данных устройств. В связи с этим целью настоящей работы являлось экспериментальное определение зависимости скорости деградации топливных элементов от частоты циклов их включения и выключения.

Для проведения ресурсных испытаний были собраны четыре батареи топливных элементов (БТЭ). Каждая батарея состояла из шести мембранно-электродных блоков габаритными размерами 59×31 мм. Электрохимические измерения осуществляли в потенциостатическом режиме при фиксированном напряжении 0.6 В на единичный топливный элемент. Собранные БТЭ подвергались циклическим запускам с различной периодичностью: 8, 4, 2 и 1 раз в месяц соответственно. Продолжительность каждого рабочего цикла составляла от 6 до 6.5 ч. По завершении циклических испытаний одна из БТЭ была дополнительно подвергнута длительному непрерывному тестированию продолжительностью 47 суток. После окончания циклических испытаний с помощью тепловизора Fluke Ti300 были получены тепловые картины распределения температуры в БТЭ в диапазоне рабочих токов от 1 до 7 А.

Показано, что скорость деградации батарей пропорциональна количеству циклов «старт–стоп». При этом наиболее интенсивное падение вольтамперных характеристик наблюдается в условиях повышенной влажности окружающего воздуха (более 35%). Анализ тепловых картин исследуемых БТЭ выявил наличие зон с повышенным температурным градиентом, локализованных в областях с ограниченным газообменом. К таким зонам относятся периферийные участки БТЭ в области расположения водородных каналов, а также зоны, прилегающие к стягивающим шпилькам. Сравнительный анализ зависимости мощности БТЭ от времени наработки в непрерывном режиме и в режиме циклических испытаний «старт–стоп» продемонстрировал, что скорость деградации при непрерывной эксплуатации приблизительно в 2.5 раза ниже по сравнению с условиями циклических нагрузок, сопровождающихся регулярными пусками и остановами.

*Работа выполнена в соответствии с Государственным заданием ФИЦ ПХФ и МХ РАН (рег. № 125033104607-0).*

УДК 621.352.6

**ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ КАНАЛОВ БИПОЛЯРНЫХ ПЛАСТИН НА ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОС В ТВЕРДОПОЛИМЕРНОМ ТОПЛИВНОМ ЭЛЕМЕНТЕ**

Белинский Е. В., Беличенко М.А., Фаддеев Н.А.

*Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)**имени М.И. Платова, Новочеркасск, Россия**e-mail: 89183415756b@gmail.com*

Твердополимерные топливные элементы (ТПТЭ) являются ключевой технологией для перехода к водородной экономике благодаря их высокой удельной мощности и низким рабочим температурам. Эффективность работы ТПТЭ во многом определяется характеристиками биполярных пластин (БП), которые отвечают за подачу реагентов, отвод воды и тепла, а также сбор тока. В каналах биполярной пластины при работе ТПТЭ параллельно протекают два фундаментальных процесса переноса: массоперенос реагентов и продуктов реакции и теплоперенос выделяющейся энергии. Эффективность обоих процессов напрямую определяет выходные электрические характеристики ТПТЭ. Состояние поверхности газораспределительных каналов, в частности её шероховатость, оказывает на эти процессы сложное и взаимосвязанное влияние.

В данной работе с помощью мультифизического моделирования в среде SOLIDWORKS Flow Simulation исследуется влияние микрорельефа (шероховатости) стенок каналов биполярной пластины на тепло- и массоперенос в ТПТЭ.

Результаты моделирования показали, что шероховатые поверхности способствуют улучшению массопереноса, управлению водным режимом и распределению плотности тока по сравнению с идеально гладкими каналами. Установлено, что средняя шероховатость около 1 мкм является оптимальной для обеспечения баланса между давлением и скоростью потока. Шероховатость стенок канала выступает в роли естественного турбулизатора. Микронеровности разрушают однородность ламинарного потока, генерируя микровихри и вторичные течения. Эти возмущения физически «взбалтывают» поток, уменьшая толщину диффузионного пограничного слоя и интенсифицируя конвективный перенос реагентов непосредственно к поверхности электрода. Таким образом, увеличение шероховатости в определенном диапазоне ведет к улучшению снабжения катализатора, снижению концентрационных потерь и позволяет ТПТЭ работать при более высоких плотностях тока без риска «голодания». Однако этот положительный эффект имеет пределы, определяемые другим процессом - теплопереносом. Теплоперенос в ТПТЭ столь же важен, поскольку рабочая температура мембраны и электродов должна поддерживаться в строго заданном диапазоне (60-80°C). Недостаточный отвод тепла ведет к перегреву и термической деградации компонентов. Основной путь отвода тепла от реакционной зоны - это конвективный теплообмен с потоком газа в каналах и далее через биполярную пластину к системе охлаждения. Шероховатость поверхности радикально влияет и на этот процесс. С одной стороны, она увеличивает фактическую площадь теплообмена между стенкой канала и газом. С другой стороны, вызываемая ею турбулизация потока значительно усиливает коэффициент конвективной теплоотдачи. Микровихри обеспечивают более интенсивное перемешивание горячих пристеночных слоев газа с более холодной центральной частью потока, что ведет к более равномерному и эффективному охлаждению стенки канала.

Полученные данные подчеркивают важность точного контроля микрогеометрии каналов при производстве БП для повышения надежности и производительности коммерческих ТПТЭ.

*Литература:*

1. Gkionis-Konstantatos O., Tavares L., Ebel T. Investigating the Role of Flow Plate Surface Roughness in Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells with the Use of Multiphysics Simulations // Batteries. — 2024. — Vol. 10, iss. 8. — Art. 276. — 22 p.

УДК 544.653

**ПРОИЗВОДСТВО ЛИНЕЙКИ КАТАЛИЗАТОРОВ ДЛЯ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ  
ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**Алексеевко Д.В.<sup>1,2</sup>, Павлец А.С.<sup>2</sup>, Гутерман В.Е.<sup>1</sup>, Алексеевко А.А.<sup>1</sup>, Беленов С.В.<sup>1,2</sup><sup>1</sup>ООО «ПРОМЕТЕЙ РД», Ростов-на-Дону<sup>2</sup>Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

e-mail: Prometheus.rd.ltd@gmail.com

Платиновые катализаторы на углеродном носителе широко используются в топливных элементах с протонообменной мембраной. Снижение содержания драгоценной платины в материалах при сохранении их высокой активности в токообразующих реакциях и стабильности в процессе функционирования является актуальной задачей электрохимической энергетики. Оптимизация способов синтеза таких электрокатализаторов позволяет оказывать влияние на их структурно-морфологические параметры, и, как следствие, на функциональные характеристики.

На сегодняшний день ООО «ПРОМЕТЕЙ РД» производит платиноуглеродные электрокатализаторы серии РМ с различным содержанием платины от 5 до 70 % мас. В настоящей работе представлены результаты совместных исследований электрокатализаторов Pt/C, полученных в ООО «ПРОМЕТЕЙ» (Россия) и изученных в лаборатории "Наноструктурные материалы для электрохимической энергетики" Южного федерального университета. На рис. 1 представлены ПЭМ-фотографии фрагментов поверхности электрокатализаторов РМ20 и РМ40, свидетельствующие о малом размере наночастиц платины и равномерном их распределении по поверхности углеродного носителя. Средний размер наночастиц Pt составляет  $2.2 \pm 0.2$  нм и  $3.0 \pm 0.2$  нм для материалов РМ20 и РМ40 соответственно.

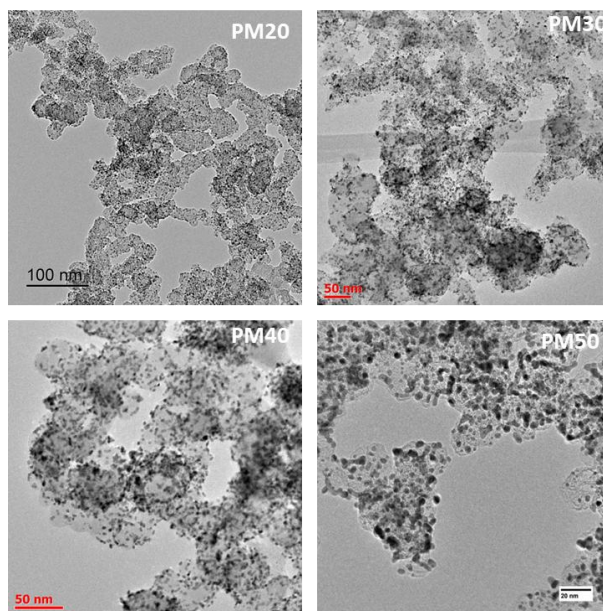


Рис. 1. ПЭМ-фотографии фрагментов поверхности электрокатализаторов РМ20(а) и РМ40(б)

Установлено, что катализаторы серии РМ демонстрируют более высокую площадь электрохимически активной поверхности (ЭХАП) и активность в реакции восстановления кислорода по сравнению с коммерческими аналогами.

Исследование выполняется при поддержке Фонда Сколково.

**ВЛИЯНИЕ КАТОДНОГО ГДС НА МОЩНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
ТОПЛИВНОГО ЭЛЕМЕНТА С ОТКРЫТЫМ КАТОДОМ**

Пинаева Е.А., Галин М.З., Бельмесов А.А., Шмыглева Л.В., Левченко А.В.

*Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии  
Российской академии наук, Черноголовка, Россия*

e-mail: pinaevaekaterina1800@gmail.com

Актуальность разработки высокоэффективных мембранно-электродных блоков (МЭБ) обусловлена возрастающими требованиями к удельной мощности и ресурсу мобильных источников тока. В составе МЭБ газодиффузионные слои (ГДС) выполняют комплекс критически важных функций: они обеспечивают подвод реагентов к активным центрам, отвод образующейся воды, равномерное распределение давления газов и электрический контакт. Эффективность работы всего устройства напрямую зависит от гидрофильных/гидрофобных свойств, пористости, толщины ГДС, а также характеристик микропористого слоя на его поверхности.

Поскольку ГДС определяет эффективность подвода реагентов, отвода продуктов реакции и тепла, его выбор является ключевым этапом конструирования МЭБ для мобильных применений. В данной работе объектами исследования выступили три марки ГДС производителя Freudenberg с микропористым слоем: Н23С2, Н23С3 и Н23С5. Выбор обусловлен их различной толщиной, степенью гидрофобизации и степенью газопроницаемости, что позволяет провести систематический анализ влияния данных параметров на транспортные свойства и стабильность работы МЭБ. Все ГДС имеют одинаковую основу, но у Н23С3 она дополнительно гидрофобизирована, Н23С3 и Н23С5 имеют одинаковый микропористый слой, тогда как Н23С2 обладает микропористым слоем иного типа. Указанные конструктивные особенности обуславливают двукратное снижение газопроницаемости Н23С2 по сравнению с остальными исследуемыми ГДС.

Испытания проводились в батареях низкотемпературных водородо-воздушных топливных элементов (БТЭ), состоящих из 8 МЭБ, каждый размерами 70×30 мм с активной площадью поверхности 12.5 см<sup>2</sup>, мембраной GoreSelect M788.12 и катализатором РМ40. На аноде всегда использовался ГДС Freudenberg Н23С3, на катоде – Freudenberg Н23С3, Freudenberg Н23С5 и Freudenberg Н23С2.

В ходе экспериментального сопоставления трёх типов ГДС в составе МЭБ показано, что максимальная удельная мощность БТЭ с катодным ГДС Н23С2 составила 425 мВт/см<sup>2</sup>, для Н23С3 – 525 мВт/см<sup>2</sup> и для Н23С5 – 540 мВт/см<sup>2</sup>. Таким образом, использование Н23С2 привело к ухудшению вольтамперных характеристик относительно образцов Н23С3 и Н23С5. Наблюдаемое снижение производительности, вероятно, обусловлено его меньшей газопроницаемостью из-за более плотного микропористого слоя. У БТЭ с катодным ГДС Н23С3 в области больших токов наблюдается более значительные потери по сравнению с Н23С5. По-видимому, это связано с пересыханием катода из-за гидрофобизации основы ГДС. Таким образом, оптимальный ГДС для БТЭ с открытым катодом должен быть с негидрофобизированной основой для лучшего влагоудерживания, и иметь высокую газопроницаемость для наилучшего подвода кислорода к зоне протекания электрохимической реакции.

*Работа выполнена в соответствии с Государственным заданием ФИЦ ПХФ и МХ РАН (Рег. № 125033104607-0).*

УДК 544.478

**НОВЫЙ ПОДХОД К СИНТЕЗУ ЭЛЕКТРОКАТАЛИЗАТОРОВ НА ОСНОВЕ ПЛАТИНЫ И ПАЛЛАДИЯ ДЛЯ КАТОДА ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ПРОТОНООБМЕННОЙ МЕМБРАНОЙ**Канцыпа И. В., Паперж К.О., Гутерман В.Е.*Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия*e-mail: kantsypa@srfedu.ru

Большой интерес к наноструктурным материалам на основе платины, палладия и их сплавов связан с их применением в качестве катализаторов в химических процессах, электролизерах и топливных элементах с протонообменной мембраной [1]. Повышение каталитической активности в токогенерирующих реакциях требует разработки новых способов синтеза, позволяющих управлять архитектурой биметаллических наночастиц (НЧ) и морфологией конечных материалов. Наиболее распространёнными методами получения НЧ благородных металлов являются жидкофазные способы синтеза [2]. Однако, механизмы формирования таких НЧ, и особенно их сплавов, в условиях жидкофазного синтеза изучены мало, что вынуждает исследователей опираться на метод проб и ошибок при совершенствовании синтеза [3].

Целью данного исследования является разработка нового подхода к синтезу биметаллических PtPd НЧ и катализаторов на их основе, предполагающего совместное или последовательное восстановление прекурсоров металлов в условиях *in situ* контроля кинетики формирования НЧ в процессе жидкофазного синтеза. В качестве методов контроля были использованы: непрерывная регистрация изменений интенсивности окраски реакционной среды и ее потенциала, тождественного индикаторному электроду, погруженного в систему, в процессе фазообразования. Состав, размер НЧ, морфология и каталитическая активность синтезированных электрокатализаторов были оценены с применением методов гравиметрии, рентгеновской спектроскопии, электронной микроскопии и вольтамперометрии.

Получена серия Pt<sub>3</sub>Pd/C катализаторов с массовой долей металлов около 40%. Различия в получении материалов заключались в моментах введения прекурсора палладия в реакционную среду в процессе восстановления платины. Данные моменты соответствуют разной "глубине" восстановления платины, которая определялась при помощи разработанного нами метода контроля кинетики фазообразования. Установлено, что момент введения прекурсора палладия в реакционную среду оказывает влияние на характеристики образующихся PtPd НЧ и электрохимическое поведение полученных материалов на их основе. Лучшие синтезированные Pt<sub>3</sub>Pd/C катализаторы характеризуются в 1.2–1.6 раз большей площадью электрохимически активной поверхности и минимум в 1.4 раза большей массовой активностью в реакции восстановления кислорода по сравнению с коммерческим аналогом JM40. Испытания катализаторов в прототипах топливных элементов показали, что полученный PtPd/C образец проявляет минимум на 15% более высокую устойчивость к деградации после 30000 циклов ресурсных испытаний по сравнению с JM40.

Таким образом, разработанный подход синтеза PtPd/C катализаторов с контролируемой архитектурой биметаллических НЧ позволяет получать перспективные материалы для применения в топливных элементах с протонообменной мембраной.

*Литература:*

1. X. Zhao, Y. Chang, W.J. Chen, Q. Wu, X. Pan, K. Chen, B. Weng Recent Progress in Pd-Based Nanocatalysts for Selective Hydrogenation // ACS Omega 7 (2021) 17–31
2. A. Pach, A. Szot, K. Fitzner, M. Luty-Błocho Opportunities and Challenges in the Synthesis of Noble Metal Nanoparticles via the Chemical Route in Microreactor Systems // Micromachines 15 (2024) 1119
3. J. Quinson, S. Kunz, M. Arenz Surfactant-Free Colloidal Syntheses of Precious Metal Nanoparticles for Improved Catalysts // ACS Catal 13 (2023) 4903–4937.2.

## ОКИСЛИТЕЛЬНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫЕ ПРОЦЕССЫ НА Pd-СОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛАХ В ПРИСУТСТВИИ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

Губанова А. А.<sup>1</sup>, Куриганова А.Б.<sup>1</sup>, Леонтьев И.Н.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)  
имени М.И. Платова, Новочеркасск, Россия

<sup>2</sup> Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия  
e-mail: alexandra20122002w@gmail.com

Исследование электрохимического поведения перекиси водорода на Pd- и PdO-содержащих электроактивных материалах обусловлен проблемами прямого и электрохимического синтеза H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, разложения H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, как негативного побочного процесса при синтезе и разложении H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> как целевого процесса при детектировании H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> вследствие того, что Pd-O оптимизирует энергию адсорбции \*ООН на Pd, который является важным промежуточным продуктом 2e<sup>-</sup> процесса восстановления кислорода. При этом, Pd-содержащие материалы, характеризующиеся высокой селективностью к образованию H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> также могут препятствовать разложению H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>.

Pd-содержащие наночастицы, осажденные на поверхность углеродного носителя были синтезированы путем термического разложения Pd(acac)<sub>2</sub> в неизотермическом режиме. Такой синтетический подход, позволил получить материалы, характеризующиеся различающимся размером кристаллитов, но весьма близким параметром решетки Pd фазы, а также наличием или отсутствием PdO в виде отдельной фазы, варьируя скорость нагрева в процессе синтеза Pd-содержащих материалов (Табл. 1).

Таблица 1 Состав и микроструктурные характеристики Pd-содержащих материалов

Образец	Фазовый состав	$D_{av}$ , нм	$a$ , Å	$c$ , Å	Концентрация, %
Pd/C	Pd ( <i>Fm3m</i> )	3.7	3.8884		100
Pd-PdO/C	Pd ( <i>Fm3m</i> )	12.7	3.8883		81.8
	PdO ( <i>P4<sub>2</sub>/mmc</i> )	5.8	3.0495	5.3169	18.2

Рассматривая функциональные свойства исследуемых Pd-содержащих материалов в качестве материала для H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> амперометрического сенсора (Рисунок 2.4 д, е) можно сказать, что амперометрический отклик при последовательном добавлении 2 ммоль H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> в 0.1 М КН<sub>2</sub>РO<sub>4</sub> характеризуется линейной зависимостью только в случае Pd/C материала примерно до концентрации H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 35 ммоль. Чувствительность сенсорного электрода составила порядка 152,7 мкА/(ммоль см<sup>2</sup>). Амперометрический отклик же Pd-PdO/C материала характеризуется явно нелинейной зависимостью (Рисунок 2.4 е), что не позволяет рекомендовать данный материал в процессах детектирования H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> в исследуемом диапазоне концентраций. Такая нелинейность может быть обусловлена, как разницей в размерах кристаллитов Pd-содержащих наночастиц (Табл. 1), так и, вероятно, наличием PdO в составе электрокатализатора, который может ингибировать процесс разложения H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>.

Таким образом, увеличение размера наночастиц Pd в Pd-содержащих материалах в сочетании с присутствием палладия в окисленной форме в виде отдельной PdO фазы оказывают критическое влияние на процесс восстановления H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, Соглашение №. 25-19-00280.*

УДК 621.352.6

**ИМПУЛЬСНАЯ АКТИВАЦИИ МЕМБРАННО-ЭЛЕКТРОДНОГО БЛОКА  
НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ТОПЛИВНОГО ЭЛЕМЕНТА**

Фаддеев Н.А., Беличенко М.А., Бондарев Н.Д.

*ЮРГПУ (НПИ), Новочеркасск, Россия**e-mail: nikita.faddeev@yandex.ru*

В рамках глобального энергетического перехода к низкоуглеродной энергетике развитие альтернативных, экологически чистых способов получения электроэнергии являются одними из основных направлений науки и технологий. Одной из наиболее серьезных и актуальных проблем возобновляемых источников электрической энергии, является разработка эффективного низкотемпературного топливного элемента (НТЭ). Активация в заданных условиях — ключевой процесс, обеспечивающий достижение оптимальных выходных характеристик вновь изготовленных батарей низкотемпературных топливных элементов [1]. Изначально их производительность, как правило, недостаточна для практического применения из-за ряда факторов, включая загрязнение примесями на этапе производства. Однако продолжительность активации, зависящая от конструкции мембранно-электродного блока (МЭБ) и применяемых методик, может составлять от нескольких часов до нескольких суток. Это не только приводит к повышенному расходу реагентов, но и снижает общую эффективность производства. Стратегия активации должна обеспечивать не только достижение максимальной мощности за минимальное время, но и не оказывать негативного влияния на долговечность топливного элемента

Рассмотрены различные способы активации мембранно-электродного блока низкотемпературного топливного элемента, основанные на методах предварительной активации, одностадийных и комбинированных методах активации. Исследовано влияние токов большой плотности в области малых напряжений МЭБ на скорость активации и стабильность рабочих характеристик низкотемпературного топливного элемента. На основании проведенных исследований разработан способ импульсной активации МЭБ НТЭ. Способ импульсной активации включает в себя несколько этапов. Первый заключается в поддержании постоянного тока, равного номинальному значению, до достижения установившегося состояния, что подтверждается плато на кривой потенциала (отклонение менее 5 %). Второй этап заключается в применении короткого замыкания для активации.

В режиме короткого замыкания, когда напряжение элемента приближается к нулю, генерируется значительный ток, что непосредственно влияет на процесс активации. Кратковременное сильное смещение потенциала во время короткого замыкания нарушает установившееся адсорбционное равновесие, вызывая быструю десорбцию промежуточных соединений (таких как Pt-OH и Pt-O) [2,3], что освобождает активные центры платины для протекания токообразующих реакций после восстановления рабочего потенциала, что и приводит к наблюдаемому увеличению напряжения МЭБ при номинальной плотности тока.

*Работа выполнена в программы развития ЮРГПУ (НПИ) при реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».*

*Литература:*

1. Chen D. et al. Proton exchange membrane fuel cell stack consistency: Evaluation methods, influencing factors, membrane electrode assembly parameters and improvement measures //Energy Conversion and Management. – 2022. – Т. 261. – С. 115651.
2. Ma M. et al. Activation methods and underlying performance boosting mechanisms within fuel cell catalyst layer //EScience. – 2024. – Т. 4. – № 6. – С. 100254.
3. Moghaddam M. S. et al. A review on progress in the field of conditioning of polymer fuel cell stacks //Journal of Power Sources. – 2024. – Т. 621. – С. 235300.

## ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

Шмыглева Л.В., Цебрук И.С., Берестенко В.И., Колмаков В.Г., Яльмаев А.Б., Бельмесов А.А.

<sup>1</sup> *Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук, Черноголовка, Россия*  
e-mail: shmygleva@icp.ac.ru

Порошковые материалы являются ключевым компонентом широкого спектра высокотехнологичных отраслей промышленности, включая аддитивные технологии (3D-печать), аэрокосмическую отрасль, медицину и энергетику. В условиях санкционных ограничений доступ к зарубежным порошковым материалам существенно затруднен: стоимость импортной продукции возросла в 2–4 раза, а ряд позиций стал полностью недоступен. В России наблюдается постепенное расширение производства порошков с заданными характеристиками, однако сохраняется зависимость от импортного оборудования и сырья, что обуславливает актуальность разработки собственных технологических решений.

Одним из перспективных подходов является создание отечественных модульных установок плазмохимического синтеза мощностью от 1 до 50 кВт с возможностью масштабирования до 1 МВт, ориентированных на получение нано- и микропорошков с контролируемой дисперсностью, фазовым составом и морфологией частиц. Данный метод позволяет получать широкий спектр материалов, включая простые соединения (Si, Mo, W, C и др.), оксиды, карбиды, нитриды и карбонитриды с размером частиц от 10 нм, а также композиты микронного диапазона. Важно отметить, что чистота получаемых материалов определяется исключительно чистотой исходных реагентов, что открывает возможность синтеза особо чистых соединений.

Особый интерес представляет применение порошковых материалов в электрохимических устройствах, таких как литий-ионные аккумуляторы (ЛИА) и низкотемпературные топливные элементы с протон-обменной мембраной (ТЭ). В обоих типах этих устройств широко используется углеродная сажа: в ТЭ она выполняет функцию носителя платины при получении электрокатализаторов, а в ЛИА применяется в качестве электрон-проводящей добавки как в отрицательном, так и в положительном электродах. Другим перспективным классом материалов являются кремнийсодержащие композитные наночастицы (Si/C или Si@SiO<sub>x</sub>), использование которых в качестве активного материала отрицательного электрода ЛИА позволяет существенно повысить удельную емкость устройства.

Традиционные подходы к синтезу подобных порошковых материалов часто ограничены узким диапазоном регулирования размера частиц и характеризуются высокой энергоемкостью. Применение СВЧ-плазмы обеспечивает гибкое управление параметрами получаемых материалов посредством варьирования состава газовой среды, скорости подачи прекурсора и времени пребывания реагентов в высокотемпературной зоне.

В докладе будут представлены результаты анализа состава и структурных параметров полученных порошковых материалов, а также оценка возможности их практического применения в электрохимических устройствах.

*Работа выполнена в рамках Государственного задания ФИЦ ПХФ и МХ РАН (номер государственной регистрации 125033104607-0).*

**ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ СИНТЕЗ PtPdCo/C КАТАЛИЗАТОРОВ ДЛЯ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

Коханов А.А., Невельская А.К., Беленов С.В.

*Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия*  
e-mail: akokhanov@sfedu.ru

Высокая стоимость платиновых катализаторов сдерживает широкое внедрение низкотемпературных топливных элементов (НТЭ). Перспективной стратегией снижения стоимости и повышения активности является использование би- и триметаллических катализаторов на основе платины [1]. Наибольший интерес представляют триметаллические системы, поскольку биметаллические аналоги могут уступать по электрохимическим характеристикам и демонстрировать низкую долговечность из-за быстрого растворения металла в электролите в жестких условиях работы катода. Решением проблемы выступает легирование платины третьим благородным металлом, например, палладием (Pd), что в ряде случаев значительно повышает стабильность катализатора [2,3]. Однако синтез наночастиц триметаллических катализаторов на углеродной подложке представляет собой сложную задачу. Для получения триметаллических катализаторов применяется ряд методов, среди которых особый интерес представляет подход, основанный на осаждении исходного материала-основы солями металлов с последующим высокотемпературным восстановлением в инертной атмосфере с добавлением водорода. Следует отметить, что на характеристики получаемого катализатора в процессе высокотемпературного синтеза существенно влияют не только условия термической обработки (температура и состав восстановительной атмосферы), но и характеристики исходного материала Pt/C или PtM/C, а также используемый метод пропитки [4].

Полученные в рамках исследования PtPdCo/C катализаторы по данным РФА содержат одну металлическую фазу, что подтверждает формирование наночастиц со структурой твердого раствора. Триметаллический катализатор продемонстрировал электрохимически активную площадь поверхности 53 м<sup>2</sup>/г(МПП) и масс-активность в реакции восстановления кислорода 446 А/г(МПП) при потенциале 0.9 В, что превышает активность коммерческого Pt/C и PtPd/C аналогов. Таким образом, метод жидкофазного восстановления боргидридом с последующей термической обработкой является эффективным подходом к получению перспективных триметаллических катализаторов для катодов низкотемпературных топливных элементов.

*Благодарность: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФ (проект № 25-79-20045). Место реализации проекта Южный федеральный университет.*

*Литература:*

1. J. W. M. Crawley, I. E. Gow, N. Lawes, I. Kowalec, L. Kabalan, C. R. A. Catlow, A. J. Logsdail, S. H. Taylor, N. F. Dummer, G. J. Hutchings // Chem. Rev. American Chemical Society, 2022. Vol. 122, № 6. P. 6795–6849.
2. W. Li, N. Bhuvanendran, H. Liu, Q. Xu, K. Hooshyari, H. Su // Journal of Alloys and Compounds. 2023. Vol. 933. P. 167706.
3. Z.-P. Wu, D.T. Caracciolo, Y. Maswadeh, J. Wen, Z. Kong, S. Shan, J.A. Vargas, S. Yan, E. Hopkins, K. Park, A. Sharma, Y. Ren, V. Petkov, L. Wang, C.-J. Zhong // Nat Commun. 2021. Vol. 12, № 1. P. 859.
4. А.К. Невельская, С.В. Беленов, А.А. Гаврилова, К.О Паперж., Н.В. Лязгунов, И.В. Панков, А.А. Коханов // Конденсированные среды и межфазные границы. 2025, Т. 27, №4, С. 651-660.

## СПЕКТРОСКОПИЯ РЕНТГЕНОВСКОГО ПОГЛОЩЕНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИНАМИКИ ЛОКАЛЬНОЙ АТОМНОЙ И ЭЛЕКТРОННОЙ СТРУКТУРЫ КАТАЛИЗАТОРОВ

Солдатов М. А., Складов В.М., Грицай М.А.

*Южный федеральный университет, Международный исследовательский центр интеллектуальных материалов, Ростов-на Дону, Россия  
e-mail: mikhailsoldatov@sfedu.ru*

Развитие современной химии и материаловедения неразрывно связано с поиском фундаментальных закономерностей «структура — свойство». Ключевой задачей гетерогенного катализа является определение механизмов реакций на поверхности активных центров для создания более эффективных и стабильных катализаторов. Одним из наиболее мощных инструментов для решения этой задачи является спектроскопия рентгеновского поглощения (XAS), включающая области XANES (ближний край) и EXAFS (протяженная структура).

В отличие от дифракционных методов, XAS не требует дальнего порядка в материале, что делает его незаменимым для исследования наночастиц, аморфных фаз и отдельных атомов. К основным достоинствам метода относятся: 1) Элементарная селективность: настройка энергии рентгеновского излучения на край поглощения конкретного элемента позволяет избирательно изучать состояние активного центра (например, Pt, Cu, Fe) на фоне сложного носителя. 2) Чувствительность к локальной структуре: анализ EXAFS-спектров позволяет с высокой точностью (до 0.01 Å) определять длины связей, координационные числа и типы соседних атомов, а также восстанавливать валентные углы и локальную симметрию. 3) Электронное состояние: форма и положение края поглощения (XANES) напрямую коррелируют со степенью окисления поглощающего атома, его электронной плотностью и симметрией занимаемых орбиталей.

Фундаментальное преимущество XAS заключается в высокой проникающей способности жесткого рентгеновского излучения. Это позволяет проводить измерения в режиме *operando* — непосредственно в ходе химической реакции при высоких температурах и давлениях. Использование специализированных *operando*-ячеек позволяет синхронно отслеживать изменение структуры катализатора и состав продуктов реакции (например, с помощью масс-спектрометрии или ИК-спектроскопии), что дает возможность зафиксировать интермедиаты и эволюцию активных фаз под воздействием реакционной среды.

Современная интерпретация спектров XAS невозможна без привлечения методов теории функционала плотности (DFT). Комбинация XAS и DFT позволяет верифицировать предложенные структурные модели, моделировать теоретические спектры для различных путей протекания реакции и устанавливать детальные механизмы каталитических циклов, связывая геометрические изменения с энергетикой элементарных актов.

В докладе будут рассмотрены последние достижения в области дизайна ячеек и численных методов обработки данных.

*Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 25-42-00116) в Южном федеральном университете.*

## АСПЕКТЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ БАТАРЕИ ВОДОРОД-ВОЗДУШНЫХ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ОТКРЫТЫМ КАТОДОМ

Галин М.З., Бельмесов А.А., Шмыглева Л.В., Герасимова Е.В., Левченко А.В.

*Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии  
РАН, Черноголовка, Россия  
e-mail: galinmz@icp.ac.ru*

Использование батарей водород-воздушных топливных элементов, ВВТЭ, в качестве резервных или вспомогательных источников энергии зачастую может сопровождаться длительными периодами простоя, а влияние таких условий эксплуатации на характеристики батарей не известно. Наиболее изученными факторами деградационных изменений к настоящему времени остаются частота запусков/остановок и условия хранения. Таким образом, проверка работоспособности батарей ВВТЭ при длительном хранении и нерегулярных запусках является важным элементом определения области их применимости. Поэтому целью данной работы являлась сборка и 3-летнее испытание БТЭ с открытым катодом номинальной мощностью 1,1 кВт, предназначенной для резервных источников питания.

Для создания электродов в качестве катализатора использовался коммерческий продукт российского производства Pt/C РМ-40 (ООО “Прометей РД”), содержащий 40 масс.% Pt. Использовалось ультразвуковое напыление на газодиффузионный слой с микропористым слоем H<sub>2</sub>C<sub>3</sub> (Freudenberg), при содержании Pt 0,6 и 0,4 мг/см<sup>2</sup> на катоде и аноде, соответственно. Мембранно-электродные блоки размером 18×4,5 см с площадью активной области 71 см<sup>2</sup> изготавливались горячим прессованием. Батарея ВВТЭ номинальной мощностью 1,1 кВт была собрана из 55 ЕТЭ, разделенных гофрированной титановой фольгой с каналами подачи воздуха.

Для приближения к реальным условиям эксплуатации БТЭ запускалась без определенной периодичности длительностью 0,6–8 часов на протяжении трех лет. В целом, наблюдается отсутствие значимых изменений ВАХ и мощностных характеристик исследуемой БТЭ. Небольшие различия можно объяснить длительностью интервалов между запусками и изменением условий окружающей среды (температурой и влажностью), влияющими на скорость разгона БТЭ, ее охлаждение и увлажнение катода (Рис. 1.).

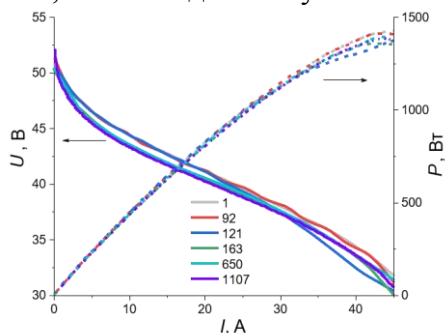


Рис. 1. ВАХ и мощностные характеристики БТЭ. Цифрами в легенде указано количество дней с даты изготовления БТЭ

*Работа выполнена в рамках государственного задания Федерального исследовательского центра проблем химической физики и медицинской химии РАН № 125033104607-0.*

**НОВЫЙ ПОДХОД К ПОЛУЧЕНИЮ АНОДНЫХ PtRu/C КАТАЛИЗАТОРОВ С  
ВЫСОКОЙ АКТИВНОСТЬЮ В РЕАКЦИИ ОКИСЛЕНИЯ МЕТАНОЛА**

Худолей А.В., Паперж К.О., Гутерман В.Е.

*Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Россия*

e-mail: khudolei@sfedu.ru

Прямые метанольные топливные элементы (ПМТЭ) являются перспективными источниками энергии, однако их широкое применение ограничено высокой стоимостью платиносодержащих катализаторов и их недостаточной активностью в реакциях окисления метанола (РОМ) на аноде и восстановления кислорода на катоде. РОМ сопровождается высоким перенапряжением из-за образования промежуточных продуктов (формальдегид, муравьиная кислота, СО и др.), блокирующих активные центры Pt [1,2].

Наиболее эффективными анодными катализаторами являются PtRu/C материалы, на которых реализуется бифункциональный механизм окисления: Ru способствует образованию ОН-групп при более низких потенциалах, чем платина, что ускоряет окисление СО и снижая отравление поверхности [2]. Высокая активность достигается при размере наночастиц (НЧ) <4 нм, равномерном их распределении и, соответственно, высокой площади электрохимически активной поверхности (ЭХАП) [3]. Управление размером и размерным распределением НЧ возможно в процессе синтеза.

Цель работы – оптимизация синтеза PtRu/C катализаторов за счет контроля процесса фазообразования биметаллических наночастиц. Нами разработана методика мониторинга процесса синтеза, заключающаяся в отслеживании изменений Red/Ox потенциала и окраски реакционной среды. Она позволяет варьировать момент введения прекурсора Ru в зависимости от глубины восстановления прекурсора Pt, которая отражается как изменения потенциала и окраски среды. Таким образом, мы можем влиять на структуру и состав получаемых наночастиц.

Получена серия PtRu/C ( $\approx 30\%$  металла) при совместном (p1) и последовательном (p2, p3) введении прекурсоров металлов в реакционную среду. Размер кристаллитов варьируется от 1.5 до 5.5 нм, а состав близок к теоретическому Pt<sub>50</sub>Ru<sub>50</sub>. По величине ЭХАП материалы располагаются в ряду  $p1 \ll p3 < p2$ . Причем для p2 ЭХАП достигает 113 м<sup>2</sup>/г, что в 2.3 раза выше таковой коммерческого аналога (PtRu/C, 60 % wt., Alfa Aesar).

Катализатор p2 демонстрирует наименьший потенциал начала РОМ и наибольшие плотности тока, а также повышенную толерантность к промежуточным продуктам окисления метанола. Его активность не менее чем в 2 раза выше коммерческого PtRu/C.

Таким образом, последовательное введение прекурсоров в процессе синтеза позволяет получать высокоэффективные PtRu/C катализаторы, перспективные для применения в качестве анодов в ПМТЭ.

*Литература:*

1. P. Phogat, B. Chand, Shreya, R. Jha, S. Singh, Hydrogen and methanol fuel cells: A comprehensive analysis of challenges, advances, and future prospects in clean energy // Int. J. Hydrogen Energy. 2025. Vol. 109. P. 465–485.
2. Петрий О.А. Прогресс в понимании механизмов электроокисления метанола и муравьиной кислоты на платиновых металлах (обзор) // ЭЛЕКТРОХИМИЯ. 2019. Т. 55. №1. С. 3–38.
3. Kirill Paperzh, Yulia Pankova, Elizaveta Moguchikh, Ilya Pankov, Egor Aydaikov, Ekaterina Gerasimova, Andrey Belmesov, Anastasia Alekseenko. Efficient PtRu/C anodes via CO-assisted synthesis: Toward high-activity and durable catalysts for hydrogen, CO, and methanol oxidation reactions // Journal of Power Sources. 2025. Vol. 656. No. 238072.

УДК 544.6

**РАЗМЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ФОТОЭЛЕКТРОХИМИИ И ФОТОКАТАЛИЗЕ**Беличенко Т.А., Ульянкина А.А.

*Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени  
М.И.Платова, Новочеркасск, Россия  
e-mail: tanya.bond.12@yandex.ru*

При анализе эффективности полупроводниковых фотокатализаторов на основе оксидов металлов большое внимание уделяется их фазовому составу и кристаллической структуре. Однако размер частиц играет определяющую роль, так как его уменьшение ведет к экспоненциальному росту удельной площади поверхности и как следствие количества активных центров адсорбции и редокс реакций [1]. К тому же, в мелких частицах путь, который должен пройти фотогенерированный носитель заряда (электрон или дырка) до поверхности раздела фаз минимален, что снижает вероятность объемной рекомбинации. В свою очередь снижение размера может усилить дефектность поверхности, которая в ряде случаев выступает центрами рекомбинации [2]. При достижении критически малых размеров (обычно менее 10 нм) наблюдается квантование энергетических уровней [3], что приводит к увеличению ширины запрещенной зоны ( $E_{bg}$ ). В случае наночастиц их размер может быть сопоставим с шириной слоя пространственного заряда, что препятствует формированию изгиба зон, который способствует разделению зарядов [4]. Увеличение размера частиц способствует формированию большего изгиба зон и более интенсивному поглощению и рассеиванию падающего излучения [3].

В работе в качестве модельного полупроводникового материала использовали оксид цинка (ZnO) с размером частиц  $D_{cp}$  в интервале 16,0–170,6 нм, который варьировали путем изменения температуры отжига. Систематическое исследование методами линейной вольтамперометрии, изменения потенциала разомкнутой цепи при освещении, электрохимической импедансной спектроскопии, Мотта-Шоттки и спада потенциала разомкнутой цепи выявило прямую зависимость фотоэлектрохимического отклика от размера частиц. При низких потенциалах смещения увеличение размера приводит к росту фототока благодаря усилению встроенного поля и низкой плотности дефектов-ловушек. Напротив, в режиме насыщения, внешний потенциал обеспечивает разделение и сбор носителей зарядов на границе раздела полупроводник/электролит для частиц меньшего размера. В фотокатализе в условиях отсутствия внешнего смещения более крупные частицы обеспечивают более эффективный транспорт электронов и дырок к поверхности за счет изгиба зон, что в сочетании с повышенным оптическим поглощением приводит к более высокой фотокаталитической активности.

Таким образом, размер частиц является критически важным параметром, без учета которого невозможна корректная интерпретация данных фотокатализа и фотоэлектрохимии, так как наблюдаемый отклик системы определяется балансом между площадью поверхности и кинетикой транспорта носителей заряда.

*Литература:*

1. Hui Ling Tan, Rose Amal, Yun Hau Ng // ACS Applied Materials & Interfaces. 2016. V.12 I.42. P.28607–28614.
2. Naniwa S., Kato K., Yamamoto A., et al. // The Journal of Physical Chemistry. 2023. V.127 I.8 P.4295-4302.
3. E.G. Goh, X. Xu, P.G. McCormick // Scripta Materialia. 2024. V.78-79 P.49-52.
4. Zhen Zhang John T. Yates, Jr. // Chemical Reviews. 2012. V.112 I.10 P.5520–5551.

УДК 004.94

## ПРИМЕНЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ ДИЗАЙНА КАТАЛИЗАТОРОВ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОВОССТАНОВЛЕНИЯ КИСЛОРОДА

Рожков Я. Д., Катария Я. В., Смирнова Н. В.

Южно-Российский Государственный Политехнический Университет, Новочеркасск, Россия  
e-mail: naaval1@mail.ru

Углеродные материалы активно исследуются в качестве каталитически активных материалов для двухэлектронного электровосстановления кислорода до пероксида водорода. Эффективность таких систем определяется совокупностью взаимосвязанных параметров, таких как структурные характеристики материала, включая степень дефектности и удельную поверхность, которые зависят прежде всего от условий получения этих углеродных материалов (температура карбонизации, продолжительность обработки, характер среды и т.д.). Оценка влияния этих разнообразных факторов на конечные характеристики углеродного материала представляет достаточно сложную задачу, решение которой может быть ускорено с применением искусственного интеллекта. Поэтому целью работы стало моделирование процесса карбонизации отходов полиэтилентерефталата (ПЭТ) на основе экспериментальных данных и методов машинного обучения, позволяющих связать условия синтеза с каталитическим откликом материала.

Для интерпретации выявленных закономерностей и прогноза свойств новых образцов экспериментальный массив был дополнен литературными данными, после чего выполнено сравнение нескольких ансамблевых алгоритмов. Наибольшую сходимость показала модель XGBoost ( $R^2 = 0,610$ ). Анализ важности признаков показал, что наибольший вклад в прогноз вносит отношение  $I_D/I_G$ , тогда как температура карбонизации, удельная поверхность и время обработки уточняют итоговую оценку. Полученные результаты показывают, что сочетание эксперимента и машинного обучения может служить эффективным инструментом направленного подбора режимов для получения каталитически активных углеродных материалов.

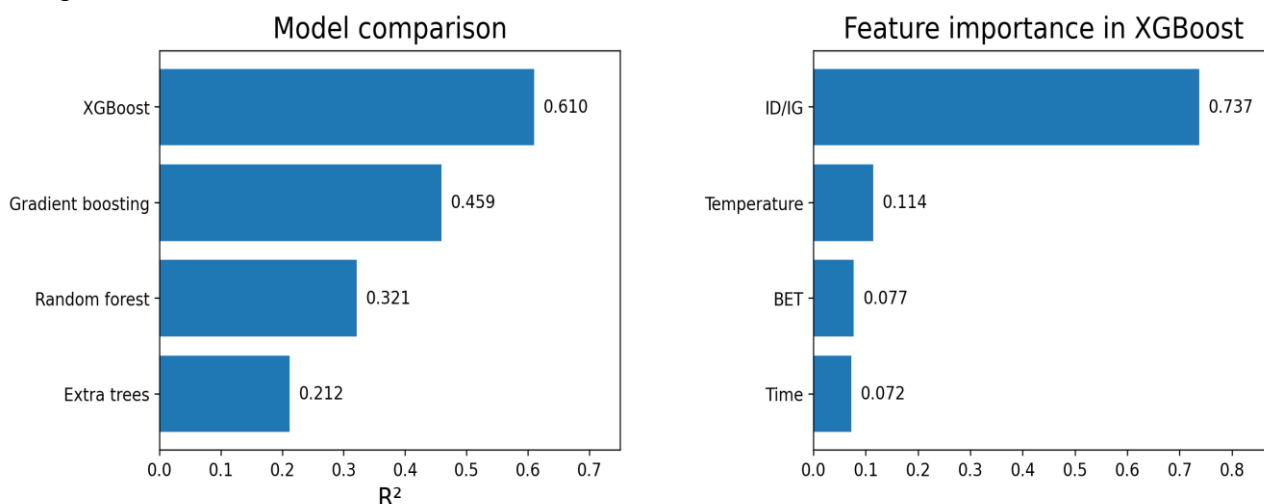


Рис. 1. Сравнение качества моделей машинного обучения и нормированная важность признаков для модели XGBoost.

### Литература:

1. Zihao Jiang, Lin Cong, Xinrui Zhou, Shengchun Hu, Yuying Zhao, Qixin Yuan // Data-Guided Exploration of Process Control in Carbon-Based Catalyst Design for Two-Electron Oxygen Reduction // Langmuir 2025, 41, 21337–21348
2. John L. A. Gardner, Zoe Faure Beaulieu and Volker L. Deringer // Synthetic data enable experiments in atomistic machine learning // Digital Discovery, 2023, 2, 651

**РАЗРАБОТКА OPERANDO ЯЧЕЙКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КАТАЛИТИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ КАТАЛИЗАТОРОВ**

Грицай М. А., Скляр В.М., Солдатов М.А.

*Международный исследовательский институт интеллектуальных материалов ЮФУ,  
г. Ростов-на-Дону, Россия  
e-mail: gritsai@sfedu.ru*

Изучение реакции восстановления кислорода (ORR) имеет первостепенное значение для совершенствования современных электрохимических энергоустановок, таких как топливные элементы [1]. Главным препятствием на пути к их массовому внедрению остается медленная кинетика ORR, требующая глубокого понимания механизмов работы катализаторов непосредственно в процессе их функционирования. Рентгеновская спектроскопия поглощения (XAS) является одним из наиболее мощных инструментов для таких исследований [2], так как позволяет отслеживать изменения степени окисления и локальной атомной структуры активных центров в режиме *operando*.

В рамках данной работы была спроектирована и изготовлена компактная *operando* ячейка модульного типа, специально оптимизированная для работы с лабораторной установкой Rigaku R-XAS Looreg. Основной корпус устройства был выполнен методом высокоточной фотополимерной 3D-печати, что позволило реализовать сложную внутреннюю геометрию каналов и обеспечить химическую стойкость конструкции в агрессивных щелочных средах. Конструктивное решение, реализованное в ячейке, позволяет уменьшить слой электролита, тем самым минимизировать поглощение и рассеяние рентгеновского пучка в растворе, обеспечивая получение спектров высокого качества.

Особое внимание при проектировании было уделено моделированию гидродинамических условий эксперимента. Система подачи электролита через внутренние каналы, интегрированная с внешней перистальтической помпой, обеспечивает стабильный проток насыщенного кислородом электролита. За счет варьирования объемной скорости прокачки в каналах ячейка позволяет эффективно моделировать диффузионные режимы и скорости вращения, характерные для стандартных измерений на вращающемся дисковом электроде. Такая конфигурация обеспечивает эффективный подвод реагентов к поверхности катализатора, что критично для корректного сопоставления спектроскопических данных с электрохимической активностью.

Апробация разработанной ячейки проводилась на примере катализатора Co-N<sub>4</sub>/NC, полученного путем пиролиза металл-органического каркаса ZIF-8/ZIF-67. В ходе экспериментов была продемонстрирована высокая воспроизводимость измерений. С помощью ячейки удалось зафиксировать динамические изменения валентного состояния активных центров (обратимый переход Co<sup>2+</sup>/Co<sup>3+</sup>) и трансформацию их координационного окружения непосредственно в процессе протекания ORR под нагрузкой. Таким образом, созданное устройство открывает широкие возможности для проведения фундаментальных *operando* исследований электрокаталитических реакций.

*Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 25-42-00116) в Южном федеральном университете.*

*Литература:*

1. Kulkarni A., Siahrostami S., Patel A., Nørskov J. K. Understanding Catalytic Activity Trends in the Oxygen Reduction Reaction // *Chemical Reviews*. – 2018. – Т. 118, № 5. – С. 2302-2312.
2. Diklić N., Clark A. H., Herranz J., Diercks J. S., Aegerter D., Nachtegaal M., Beard A., Schmidt T. J. Potential Pitfalls in the Operando XAS Study of Oxygen Evolution Electrocatalysts // *ACS Energy Letters*. – 2022. – Т. 7, № 5. – С. 1735-1740.

**АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА КОМПОЗИТНЫХ  
БИПОЛЯРНЫХ ПЛАСТИН**

Беличенко М.А., Фаддеев Н.А.

*Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени  
М.И.Платова, Новочеркасск, Россия  
e-mail: maxim\_belichenko@mail.ru*

Разработка экологичных, высокопроизводительных и энергоемких источников энергии входит в число ключевых приоритетов научно-технического прогресса. Кроме того, это имеет решающее значение для построения автономных и не требующих обслуживания энергосистем в сфере распределенной энергетики, робототехники и транспорта. Отдельного внимания заслуживает водородная энергетика, которая фокусируется на применении водорода и его соединений в качестве носителей энергии для повышения эффективности энергосистем различного назначения. К перспективным технологиям относят топливные элементы (ТЭ), где генерация электричества происходит напрямую за счет реакции между водородом и кислородом, минуя этапы промежуточных преобразований. Это позволяет достичь более высокого коэффициента полезного действия по сравнению с классическими энергоустановками и полностью исключить выбросы углекислого газа, так как единственным продуктом реакции выступает вода.

Эффективность преобразования химической энергии в электрическую в ТЭ зависит от множества факторов, включая равномерность распределения реагентов, электропроводность между ячейками и эффективность теплоотвода. Все эти функции выполняет биполярная пластина (БП) [1]. Оптимальными материалами для БП считаются проводящие полимерные композиты (ППК), обладающие высокой электропроводностью, механической прочностью и низкой стоимостью. ППК создаются путем введения проводящих наполнителей в полимерную матрицу. Однако разнообразие композитных составов требует тщательного выбора методов их изготовления. Одно из наиболее перспективных направлений производства БП из ППК является применение аддитивных технологий.

В данном исследовании изучается возможность применения лазерной стереолитографии для производства композитных БП. Исследуются физико-химические свойства смол, имеющихся на рынке, степень их наполняемости, а также принципиальная применимость данной технологии для производства. На сегодняшний день проведен ряд экспериментов, подтверждающих применимость данной технологии. В ходе эксперимента было доказано, что наполненная смола имеет электрическую проводимость, как поверхностную, так и сквозную. Также было установлено, что энергии концентрированного лазерного луча (длина волны 405 нм, мощность 0,5 Вт) достаточно для термического расширения окисленного графита, что позволяет снизить первоначальное наполнение смолы.

Технология лазерной стереолитографии позволяет производить БП с высокой точностью и минимальной толщиной, а применение инженерных смол, позволит достичь превосходных физико-химических и механических характеристик.

**Литература:**

1. Irshad H. M., Shahgaldi S. Comprehensive review of bipolar plates for proton exchange membrane fuel cells with a focus on materials, processing methods and characteristics //International Journal of Hydrogen Energy. – 2025. – Т. 111. – С. 462-487.

## ТРАНСПОРТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГИБРИДНЫХ МЕМБРАН ДЛЯ ВОДОРОДНОГО ТОПЛИВНОГО ЭЛЕМЕНТА

Мещерякова Е. Е., Чиркова Е.А., Кудрина В.Ю., Фалина И.В., Кононенко Н.А.

*ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет», Краснодар, Россия*  
*e-mail: katerina6327095@gmail.com*

Водородный топливный элемент (ТЭ) с протонообменной мембраной представляет собой экологически чистую альтернативу традиционным источникам энергии. Для эффективной работы ТЭ мембрана в составе мембранно-электродного блока (МЭБ) должна обладать высокой протонной проводимостью в условиях повышенной температуры и пониженной влажности в сочетании с механической прочностью и низкой газопроницаемостью. Модифицирование перфторированных мембран кислым фосфатом циркония (КФЦ) может обеспечить высокую протонную проводимость [1], а добавление инертного фторполимера улучшает механические свойства и сдерживает набухание мембраны [2]. Целью данной работы было изучение транспортных свойств мембран, модифицированных одновременно КФЦ и инертным полимером Ф-26.

В качестве объектов исследования выступала серия гибридных поливных протонообменных мембран МФ-4СК (ОАО «Пластполимер»), содержащих 10 – 20 масс. % Ф-26 (сополимер винилиденфторида с гексафторпропиленом) и 4 – 10 масс. % КФЦ. Экспериментально определены диффузионная проницаемость в растворах соляной кислоты с использованием непроточной двухкамерной ячейки и удельная электропроводность мембран при повышенной температуре от 30 до 90 °С и относительной влажности 30 %.

Анализ концентрационных зависимостей диффузионной проницаемости показал ее снижение при увеличении содержания Ф-26 в структуре мембраны. Однако диффузионные характеристики образцов мембран при совместном присутствии Ф-26 и КФЦ ниже, чем мембран, содержащих только инертный фторполимер, и не зависят от содержания КФЦ. Изучение диффузионных характеристик позволяет на качественном уровне судить о газопроницаемости мембраны при работе в топливном элементе.

Изучение температурных зависимостей удельной электропроводности исследуемых мембран при относительной влажности 30% показывают ее возрастание при увеличении содержания КФЦ, а значения энергии активации электропроводности, полученные из температурных зависимостей, снижаются по мере увеличения доли КФЦ в мембране. Таким образом, допанты фторполимер Ф-26 и КФЦ при совместном присутствии оказывают на транспортные характеристики перфторированной мембраны комплексный эффект, приводя к одновременному снижению диффузионной проницаемости и возрастанию протонной проводимости.

Благодарим Тимофеева С.В. (ОАО «Пластполимер») за предоставленные образцы.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Кубанского научного фонда в рамках научного проекта № МПИ-25.1/19.*

Литература:

1. Falina I. V., Meshcheryakova E. E., Lyapishev K. M. [et al.] // Membranes and Membrane Technologies. – 2024. Vol. 6, № 6. P. 383-390.
2. Falina I., Kononenko N., Timofeev S., Rybalko M., Demidenko K. // Membranes. 2022. V. 12, № 10. P. 935.

**ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ОБРАБОТКИ НА ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТЬ  
РОССИЙСКИХ ПРОТОНООБМЕННЫХ МЕМБРАН**

Бескопыльный Е. Р.<sup>1,2</sup>, Гаврилова А. А.<sup>1</sup>, Мауэр Д. К.<sup>1</sup>, Кожокаръ. Е. Л.<sup>1,2</sup>, Алексеенко А. А.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Южный Федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия*

<sup>2</sup>*ООО «Хайдэн», ст. Павловская, Краснодарский край, Россия*

*e-mail: beskopylnyy@sfedu.ru*

Протонообменная мембрана (ПОМ) является одним из ключевых компонентов мембранно-электродных блоков (МЭБ) низкотемпературных топливных элементов (НТЭ). Омические потери напряжения на ПОМ оказывают значительное негативное влияние на производительность МЭБ. Таким образом, задача повышения электропроводности ПОМ является актуальной в контексте перехода к массовой коммерциализации НТЭ. Один из способов снижения сопротивления коммерчески производимых ПОМ является их обработка в растворах кислот [1, 2]. В некоторых работах также применяют обработку в растворе пероксида водорода для окисления и удаления органических загрязнений [3].

В данной работе проведено систематическое исследование влияния режима обработки на электропроводность протонообменных мембран, предоставленных российскими производителями и научными группами.

Обработку мембран проводили в растворах  $H_2SO_4$  (1М) и  $HCl$  (1М и 0.5 М). Исследовалось влияние последующей обработки в растворе  $H_2O_2$  (3%). Измерение электропроводности мембран проводили методом электрохимической импедансной спектроскопии. Образцы предварительно выдерживали в деионизированной воде в течение 1 часа, после чего зажимали между двумя электродами круглого сечения и записывали спектр импеданса в диапазоне 50 кГц – 1 Гц при напряжении разомкнутой цепи с амплитудой 10 мВ.

По результатам исследования установлены режимы обработки, позволяющие достичь наибольшей электропроводности каждой исследованной мембраны.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере № 5416ГСИ/112008.*

*Литература:*

1. E. Lufrano, C. Simari, M.L. Di Vona, I. Nicotera, R. Narducci // *Polymers*. 2021. V. 13. P. 359.
2. F. Bauer, S. Denneler, M. Willert-Porada // *J. Polym. Sci. Part B: Polym. Phys.* 2005. V. 43. P. 786–795.
3. M. Hara, J. Inukai, K. Miyatake, H. Uchida, M. Watanabe // *Electrochim. Acta*. 2011. V. 58. P. 449–455.

УДК 544.6

**ЛИТИЙ- И НАТРИЙ-ПРОВОДЯЩИЕ НАФИОН-ПОДОБНЫЕ МЕМБРАНЫ ДЛЯ ХИМИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ**Каюмов Р.Р., Глухов А.А., Лапшин А.Н., Лочина А.А., Шмыглева Л.В.*Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии  
Российской академии наук, Черноголовка, Россия*e-mail: kayumov@icp.ac.ru

Металл-ионные аккумуляторы (МИА) являются неотъемлемым компонентом современной инфраструктуры портативной и стационарной электроники, находя применение в широком спектре устройств – от носимых гаджетов и мобильных телефонов до электротранспорта. Одним из ключевых функциональных элементов таких устройств является электролит. В качестве перспективной альтернативы жидким электролитным системам рассматриваются полимерные, разработка и исследование которых представляют собой актуальную задачу материаловедения. Твердополимерные электролиты играют критически важную роль в создании более безопасных электрохимических устройств, а также в расширении температурного диапазона эксплуатации МИА.

Особый научный и практический интерес представляют полиэлектролиты, обладающие униполярной проводимостью по катионам. В связи с этим целью настоящей работы являлось исследование свойств полимерных мембран – аналога Нафион, а именно мембраны ZD-IEM105 производства китайской компании Jilin Zhongding Energy Storage Technology Co., Ltd. (ZONDING Energy) в литиевой (Li-Z105) и натриевой (Na-Z105) формах, пластифицированных смесями этиленкарбоната и сульфолана.

Согласно данным ЯМР и ИК-спектроскопии, молекулярная структура исследуемой мембраны идентична структуре мембраны Нафион. Удельная проводимость образцов по ионам лития и натрия достигает значений 0.024 и 0.023 мСм/см соответственно при понижении температуры до  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  и возрастает до 1.3 и 0.86 мСм/см при нагревании до  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что превосходит показатели аналогичных электролитов на основе Нафион в сопоставимых условиях. При температуре  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  удельная ионная проводимость образцов варьируется в диапазоне 0.2–0.35 мСм/см для литиевой формы и 0.1–0.8 мСм/см для натриевой. Образцы, насыщенные смесью растворителей с массовой долей этиленкарбоната 0.5, сохраняют ионную проводимость во интервале температур от  $-50$  до  $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Исследуемые электролитные системы как в литиевой, так и в натриевой форме характеризуются электрохимической стабильностью до потенциала 4.5 В отн. М<sup>+</sup>/М. Определенные значения чисел переноса составили 0.64 для ионов лития и 0.82 для ионов натрия.

Таким образом, исследуемые в данной работе электролитные системы являются перспективными для применения в МИА с возможностью их эксплуатации в широком температурном диапазоне

*Коллектив авторов выражает благодарность РНФ № 24-29-00484, <https://rscf.ru/project/24-29-00484/>.*

*Работа выполнена по теме Государственного задания ФИЦ ПХФ и МХ РАН (№ государственной регистрации 124013000692-4).*

## ИССЛЕДОВАНИЕ СЕЛЕКТИВНОСТИ ГЕТЕРОГЕННЫХ КАТИОНО- И АНИОНООБМЕННЫХ МЕМБРАН С РАЗЛИЧНЫМ СОДЕРЖАНИЕМ ДОЛИ ИОНООБМЕННОЙ СМОЛЫ

Осташевская К.С., Корчевная А.И., Шкирская С.А.  
ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет», Краснодар, Россия  
e-mail: shkirskaya@mail.ru

Селективность ионообменных мембран является одной из важнейших характеристик, определяющих эффективность мембранных процессов, таких как электролиз, электромембранное разделение и концентрирование и др. Для количественной характеристики селективности используют числа переноса ионов через мембрану, которые представляют собой долю тока, переносимого ионами данного сорта, поэтому их называют электромиграционными или «истинными». Экспериментальное определение электромиграционных чисел переноса сопряжено со значительными методическими трудностями. Для их оценки часто применяют различные подходы [1], открывающие возможность расчета чисел переноса в ионообменных мембранах на основании таких свойств как электропроводность, коэффициенты диффузионной и электроосмотической проницаемости, потенциометрических чисел переноса ионов.

Целью работы являлось определение «истинных» чисел переноса ионов в мембранах МА-41 и МК-40<sup>1</sup> с различным содержанием полиэтилена 31 – 45 %.

Определение «кажущихся» чисел переноса противоионов ( $t_{i\ app}$ ) через мембрану проводилось потенциометрическим методом. Числа переноса воды ( $t_w$ ) были определены объемным методом в двухкамерной ячейке с поляризующими хлоридсеребряными электродами. Эксперименты проводили в растворе NaCl с диапазоном концентраций 0.1 – 3 М. Эти данные использовали для оценки «истинных» чисел переноса противоионов с помощью уравнения Скачарда:

$$t_i^* = t_{i\ app} + m_{\pm} 10^{-3} t_w \quad (1)$$

где  $m_{\pm}$  – средняя моляльная концентрация внешнего раствора.

Для сравнения был применен другой способ оценки «истинных» чисел переноса, который включает использование экспериментальных данных концентрационных зависимостей электропроводности и диффузионной проницаемости мембран. Расчет проводился с использованием уравнения:

$$t_i^* = \frac{L_i^*}{L_+^* + L_-^*} \quad (2)$$

где  $L_+^*$  и  $L_-^*$  – концентрационные зависимости электродиффузионных коэффициентов противоиона и коиона.

Полученные результаты показали, что истинные числа переноса ионов слабо зависят от содержания доли ионообменной смолы в мембране. Следует отметить, что катионообменные мембраны обладают высокой селективностью – значение  $t_+^*$  близко к 1 во всем исследуемом диапазоне концентраций. Числа переноса ионов в анионообменных мембранах сильнее зависят от концентрации внешнего равновесного раствора: в разбавленных растворах близки к 1, но с увеличением концентрации до 3 М снижаются до 0.85.

*Литература:* 1. О.А. Демина, С.А. Шкирская, Н.А. Кононенко, Е.В. Назырова // Электрохимия. 2016. Т. 52. № 4. С. 339–346.

<sup>1</sup>Образцы изготовлены в ООО «ИП «Щекиноазот» и предоставлены профессором В.И. Васильевой

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОТРАВЛЕНИЯ АНИОНООБМЕННОЙ МЕМБРАНЫ КОМПОНЕНТАМИ ЯБЛОЧНОГО СОКА МЕТОДОМ ХРОНОПОТЕНЦИОМЕТРИИ

Бровкина М.А., Фалина И.В., Лоза Н.В.

ФГБОУ ВО «Кубанский государственный университет», Краснодар, Россия

e-mail: andreeva\_marina\_90@bk.ru

Электродиализ (ЭД) с биполярными мембранами является экологически чистым методом регулирования pH соков без добавления химических реагентов [1]. Однако при реализации процесса переработки пищевых продуктов осадкообразование внутри и на поверхности ионообменных мембран приводит к снижению их проницаемости, сокращает срок службы, а также увеличивает энергопотребление и стоимость конечного продукта. Поэтому целью данной работы является изучение процесса осадкообразования на анионообменной мембране в контакте с натуральным соком методом хронопотенциометрии (ХП) в лабораторной ячейке.

Исследование процесса осадкообразования на поверхности отечественной гетерогенной мембраны МА-41 проводилось в 4-х камерной лабораторной ячейке. Ориентация вспомогательных мембран (МА-41 и МФ-4СК), рабочие растворы указаны на рис. 1. Регистрация pH осветленного яблочного сока осуществлялась на выходе из камеры обессоливания. Мембранный потенциал (МП) измерялся при помощи капилляров Лугина-Габера, подведённых к исследуемой мембране и соединённых с AgCl/Ag электродами. Предельный ток ( $i_{lim}$ ) для мембраны МА-41 был определен путем обработки методом касательных экспериментальных вольтамперных кривых. ХП измерения проводились при наложении на платиновые поляризуемые электроды постоянного электрического тока в диапазоне от 0,2 до 2,5  $i_{lim}$  в течение 15 и 180 минут.

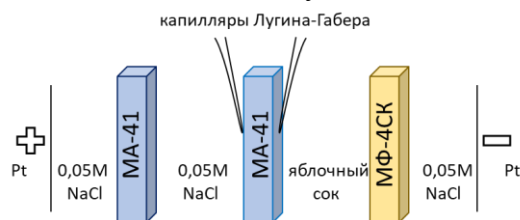


Рис. 1. Схема лабораторной ячейки

После трехчасового измерения ХП кривой при любой  $i$  на поверхности мембраны, контактирующей с яблочным соком, наблюдается ферментативное потемнение и образование пленки. Интенсивность окрашивания поверхности мембраны и контрастность пленки увеличивается с возрастанием  $i$ , подаваемого на систему. В процессе измерения МП при  $i_{lim}$  на поверхности мембраны формируется осадок грибковой колонии, появляющейся из-за применения фермента пектиназу для осветления сока. При токах выше  $1,3i_{lim}$  фиксируется подкисление раствора, вызванное генерацией  $H^+$  и  $OH^-$  на обедненной межфазной границе мембрана/раствор. Таким образом, для дальнейшего изучения процесса в лабораторном электродиализном аппарате рекомендуется использовать плотность тока  $4,5 \text{ mA/cm}^2$ , что приводит к достаточной генерации  $H^+$  и  $OH^-$  ионов и снижает скорость отравления ионообменной мембраны ферментами.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Кубанского научного фонда в рамках научного проекта № Н-25.1/24.

Литература:

1. Y. Wang, C. Jiang, L. Bazinet, T. Xu // Separation of Functional Molecules in Food by Membrane Technology. 2019. P. 349–381.

## ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ И СТРУКТУРНО-МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА Pt/C ЭЛЕКТРОКАТАЛИЗАТОРОВ: РОЛЬ СООТНОШЕНИЯ (УГЛЕРОД : МЕЛАМИН) ПРИ МОДИФИЦИРОВАНИИ УГЛЕРОДНОГО НОСИТЕЛЯ

Криводубский Д.П.<sup>1</sup>, Баян Ю.А.<sup>1</sup>, Герасимов Е.Ю.<sup>2</sup>, Алексеенко А.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Южный Федеральный Университет, Ростов-на-Дону, Россия

<sup>2</sup>ФГБУН Институт катализа имени Г. К. Борескова СО РАН, Новосибирск, Россия

e-mail: [dmitriy12k@yandex.ru](mailto:dmitriy12k@yandex.ru)

Управление характеристиками топливных элементов с протонообменной мембраной (ПОМТЭ) происходит путем совершенствования свойств их основной составляющей – платиноуглеродных электрокатализаторов – наночастицы платины нанесенные на углеродный носитель (УН). В данной работе акцент был сделан на управление характеристиками катализатора путем допирования азотом углеродной подложки при различных соотношениях углерод : азотсодержащее соединение (меламин).

Путем термообработки коммерческой сажи Ketjenblack EC-300J при различных соотношениях (С:меламин – 1:1, 1:2, 1:5, 1:10), были получены модифицированные углеродные носители. В ходе проведенного стресс-тестирования модифицированные УН проявили лучшую устойчивость к окислению поверхности, чем исходная сажа (рис. 1).

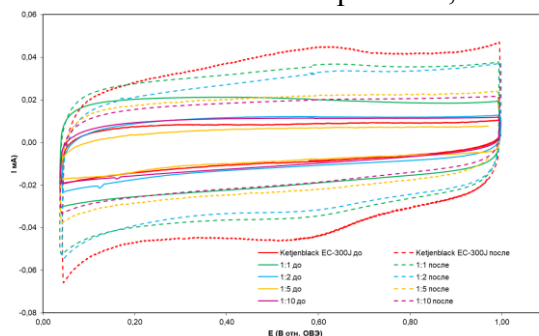


Рис. 1. Циклические вольтамперограммы носителей до и после стресс-тестирования,  $\text{HClO}_4$ , атмосфера Ar, 20 мВ/с

Методом жидкофазного синтеза в водно-органической среде на основе исходной и модифицированных УН были получены Pt/C электрокатализаторы с массовой долей платины от 18% до 21%. Методом просвечивающей электронной микроскопии было установлено узкое размерное распределение НЧ в диапазоне 1.5-2 нм. В ходе исследования электрохимических характеристик полученных катализаторов было установлено, что они обладают более высокими значениями площади электрохимически активной поверхности и активности в реакции восстановления кислорода, чем коммерческий аналог HISPEC 3000 с массовой долей платины 20%. Сравнимая с коммерческим аналогом или большая устойчивость катализаторов, соответствующих высокостабильным УН, была подтверждена тестированием образцов в ускоренном стресс-тестировании. Наиболее высокие удельные характеристики из исследуемой линейки образцов проявляет катализатор на УН с соотношением С:меламин – 1:10. В дальнейшем планируется тестирование полученных образцов в условиях работы мембранно-электродного блока.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-79-10162 реализуемого в Южном федеральном университете.

1. Huang L. Advanced Platinum-Based Oxygen Reduction Electrocatalysts for Fuel Cells // Acc Chem Res. American Chemical Society. 2021. Т. 54. № 2. С. 311–322.

2. Tachibana N. Pt nanoparticles supported on nitrogen-doped porous carbon as efficient oxygen reduction catalysts synthesized via a simple alcohol reduction method // SN ApplSci. Springer Nature. 2021. Т. 3. № 3.

**ИССЛЕДОВАНИЕ Ag-СОДЕРЖАЩИХ КОМПОЗИТОВ,  
ПОЛУЧЕННЫХ В УСЛОВИЯХ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОЛИЗА  
В СОСТАВЕ СУПЕРКОНДЕНСАТОРОВ**

Ставенчук Э.А., Алексеенко Е.А., Куриганова А.Б.

*Южно-Российский государственный политехнический университет  
имени М.И. Платова, Новочеркасск, Россия  
e-mail: eleonora\_staven@mail.ru*

Материалы на основе благородных металлов интенсивно исследуются в качестве компонентов электродных материалов для суперконденсаторов (СК), поскольку они могут повысить их удельную емкость, проводимость, а также химическую и термическую стабильности [1]. Среди благородных металлов, серебро является наиболее недорогим металлом и его применяют в составе электродных материалов СК в виде композитов Ag/углеродный материал, Ag/оксиды металлов, Ag/полимерный материал. В данной работе будут исследованы свойства композитов Ag/углеродный материал, полученных в условиях импульсного электролиза [2].

Синтез Ag-содержащих композитов проводили в условиях импульсного электролиза. Для этого два серебряных электрода помещали в водный раствор  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  электролита (0,5 моль/л) и подавали на электроды переменный импульсный ток (1 А/см<sup>2</sup>, 50 Гц). Под действием переменного импульсного тока происходило разрушение Ag электродов образованием дисперсных продуктов в объеме электролита. По окончании синтеза дисперсный продукт был отфильтрован, многократно промыт дистиллированной водой и высушен на воздухе при 80 °С до постоянной массы. Углеродный материал (Vulcan XC-72) в состав композита вносился двумя способами: 1) Vulcan XC 72 вносили в раствор электролита и Ag электроды подвигались электрохимическому диспергирования непосредственно в суспензии углеродной сажи в растворе  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (в дальнейшем такой образец будет маркирован, как Ag/C), 2) Vulcan XC 72 смешивали с дисперсным Ag-содержащим продуктом уже после синтеза (Ag+C образец). Содержание Ag в композите в обоих случаях составляло ~70 % масс.

Методом рентгенофазового анализа установлено, что серебро в Ag/C материале представляет собой частицы металлического серебра со средним размером кристаллитов 49,4 нм, а в образце Ag+C – серебряная компонента представляет собой смесь Ag/Ag<sub>2</sub>O в соотношении концентраций фаз 75% / 25 % соответственно. Размер кристаллитов фазы Ag – 16 нм. а Ag<sub>2</sub>O – 9,5 нм. Исследование электрохимических свойств синтезированных композитов в качестве материалов СК проводили в стандартной трехэлектродной ячейке в водном растворе КОН электролита (0,05 моль/л) методом гальваностатического заряда-разряда. Установлено, что удельная емкость при плотности тока 6 А/г для Ag/C образца составила ~190 Ф/г, а для Ag+C образца всего 34 Ф/г, что свидетельствует о существенном влиянии как состава, так и микроструктурных характеристик серебряной компоненты в Ag/углеродный материал композитах на их электрохимические характеристики в составе СК.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, Соглашение № 25-23-00192.*

*Литература:*

1. Y. Yan, T. Wang, X. Li, H. Pang, H. Xue // Inorg. Chem. Front. 2017. V. 4. P. 33-51.
2. A. Kuriganova, et.al. // J. Electroanal. Chem. 2025. V. 996. P. 119419.

УДК 544.6

**ВЛИЯНИЕ СОСТАВА ЭЛЕКТРОЛИТА НА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ АЛЮМИНИЯ В УСЛОВИЯХ ИМПУЛЬСНОГО ЭЛЕКТРОЛИЗА**Кубанова М. С., Юрьева Т.М., Андреева В.Е., Куриганова А.Б., Смирнова Н.В.

*Южно-Российский государственный политехнический университет  
имени М.И. Платова, г. Новочеркасск, Россия  
e-mail: kubanova\_mc@mail.ru*

Исследование электрохимического поведения металлов в условиях импульсного электролиза, с целью получения новых функциональных материалов активно ведется в последние десятилетия. Ключевым фактором, определяющим выход продукта и его фазовый состав, является природа компонентов электролита [1].

Исследования проводились с использованием электродов из алюминия марки А5 в водных растворах солей при варьировании катионного и анионного состава. Использовался режим симметричного переменного импульсного тока. Скорость диспергирования оценивалась гравиметрическим методом.

В результате проведенных исследований установлена четкая зависимость скорости разрушения алюминия от радиуса и энергии гидратации катионов. Для однозарядных и некоторых двухзарядных катионов установлен ряд уменьшения скорости:  $K^+ > Na^+ > NH_4^+ > Ba^{2+} > Sr^{2+}$  от 180 до 150 мг/см<sup>2</sup>·ч (рис. 1). Вероятно, это связано с изменением перенапряжения выделения водорода и адсорбционной способностью ионов на поверхности металлов [2].

*Рисунок 1. Зависимость скорости диспергирования алюминия от природы катиона электролита*

Интересные результаты были получены в электролитах, содержащих катионы  $Mg^{2+}$  и  $Ca^{2+}$ , здесь диспергирование металла не наблюдается, а электроды покрываются плотной пленкой. Это свидетельствует о превалировании процессов анодного окисления над процессами катодного внедрения и последующего разрушения решетки [3].

Анионный состав электролита оказывает влияние на фазовую структуру продуктов, что подтверждается данными рентгенофазового анализа.

Состав электролита оказывает существенное влияние на электрохимическое поведение алюминия в условиях импульсного электролиза, позволяя варьировать как скорость накопления продуктов, так и фазовый состав.

*Литература:*

1. Левинсон А.М. Электрохимическая обработка металлов. – М: Машиностроение, 2021.
2. Коровин Н.В. Общая химия: Учеб. Для вузов. – М: Высшая школа, 2022.
3. Маршаков А.И. Закономерности растворения и пассивации металлов при импульсном электролизе// Электрохимия. – 2023. – Т. 59, № 4. – С. 112-125.

## ЛИТИЙ-ИОННЫЕ АККУМУЛЯТОРЫ ДЛЯ МИКРОСПУТНИКОВ НА НИЗКОЙ ОКОЛОЗЕМНОЙ ОРБИТЕ

Колмаков В.Г., Евщик Е.Ю., Шиховцева А.В., Левченко А.В.

*Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии  
Российской академии наук, Черноголовка, Россия  
e-mail: hotbrinc@gmail.com*

В данной работе представлен обзор современного состояния и перспектив применения литий-ионных аккумуляторов (ЛИА) в системах электропитания микроспутников типа CubeSat, функционирующих на низкой околоземной орбите (НОО).

Литий-ионные аккумуляторы являются основным типом накопителей энергии для современных КА благодаря высокой удельной энергии (150–270 Вт·ч/кг), что позволяет существенно снизить массу аппарата и, как следствие, стоимость запуска. Опыт успешной эксплуатации ЛИА на аппаратах PROBA-1 (более 20 лет, >100 000 циклов) подтверждает их способность обеспечивать длительный ресурс работы на НОО.

Условия низкой околоземной орбиты предъявляют жесткие требования к ЛИА: до 15 циклов заряда-разряда в сутки (до 6000 циклов в год) при глубине разряда 10–40%, воздействие глубокого вакуума, ионизирующего излучения (до 30 кРад за 5 лет). Температура батареи внутри корпуса спутника, зачастую, составляет 3...13 °С.

Выбор катода определяется спецификой миссии. LFP обладает удельной емкостью в 150-160 мАч/г, высокой стабильностью при циклировании и дешевизной, что делает его перспективным для использования в долгосрочных миссиях. Удельная емкость NMC составляет 150-200 мАч/г, в зависимости от количества никеля в составе материала, однако при повышении емкости падает стабильность циклирования, что делает NMC менее привлекательным для использования на НОО – в схожих условиях ЛИА на основе LFP показали сохранение 80% емкости при 2000 циклов заряда-разряда, в то время как разрядная емкость NMC упала ниже 80% уже после 300 циклов.

В качестве анода среди ЛИА для спутников доминирует графит. Высокоемкие кремний-углеродные композиты пока не нашли широкого применения из-за низкой стабильности при циклировании – в связи с объемным изменением материала происходит деградация аккумулятора из-за большого количества циклов заряда-разряда. Электролиты на основе 1M LiPF<sub>6</sub> в смеси циклических и линейных карбонатов являются стандартом. Для работы при низких температурах (до -40°C) необходима оптимизация состава растворителей (например, добавление метилпропионата) и использование функциональных добавок (например, LiFSI для лучшей проводимости).

Для использования в космосе предпочтительны коммерческие ЛИА в жестком корпусе, типа цилиндрических ячеек и призматических аккумуляторов – это обосновано тем, что стальной корпус обеспечивает механическую прочность, устойчивость к перепадам давления и вибрациям, а встроенные системы защиты (PTC, CID) минимизируют риски теплового разгона. Серийное производство гарантирует низкую стоимость и воспроизводимость характеристик. Ячейки же пакетного типа в мягком корпусе (Li-pol) подвержены вздутию в вакууме, а использование жесткого каркаса для таких ячеек, например из эпоксидной смолы, нивелирует преимущество в удельных характеристиках по сравнению с ЛИА в стальных корпусах.

Таким образом можно сделать вывод, что для «средней» миссии CubeSat на орбите наиболее оптимальными могут стать аккумуляторы форм-фактора 18650 на основе LFP, поскольку это позволит сделать систему энергоснабжения спутника надежной, дешевой и безопасной.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ по теме Государственного задания, № государственной регистрации 124013000692-4.*

УДК 658.262:504.05

## ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ОБРАЗОВАНИЯ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ ПРИ СЖИГАНИИ УГЛЕРОДНОГО БРИКЕТА НА ОСНОВЕ ПИРОЛИЗНОЙ САЖИ В КОНТЕКСТЕ НИЗКОУГЛЕРОДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Зубков И.Н.<sup>1</sup>, Клушин В.А.<sup>1</sup>, Васьковский А.В.<sup>1</sup>, Салиев А.Н.<sup>2</sup>, Папета О.П.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия

<sup>2</sup>Тульский государственный университет, Тула, Россия

e-mail: ivan.n.zubkov@yandex.ru

В контексте перехода к углеродной нейтральности особое внимание уделяется технологиям переработки углеродсодержащих и полимерных отходов в высокоэнергетические материалы. Брикеты на основе смешанного полимерного связующего и сажи после пиролиза изношенных автомобильных шин обладают оптимальным балансом механической прочности и гидрофобности. Для использования полученных брикетов в качестве твердого топлива необходимо оценить характеристики горения и выбросов.

Расчеты состава продуктов сгорания углеродного брикета на основе пиролизной сажи и полимерного связующего выполнены в программе Aspen HYSYS путем минимизации значения свободной энергии Гиббса при значении  $\alpha=1$  в интервале температур 500-1200 °С и атмосферном давлении. Для расчета использованы следующие значения по составу углеродного брикета на основе пиролизной сажи и полимерного связующего, масс. %: N – 0,87; C – 62,01; H – 2,76; S – 2,03; O – 0,03; зольность – 32,3.

Анализ данных показывает, что основными газовой фазы являются N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> и H<sub>2</sub>O. Их концентрации остаются практически неизменными во всем исследуемом температурном диапазоне. Низкое содержание монооксида углерода или его отсутствие свидетельствует о полноте окисления углеродной матрицы в условиях стехиометрического окисления. Низкое содержание кислорода в продуктах также подтверждает корректность выбора  $\alpha=1$ .

Таблица 1

*Равновесный состав продуктов окисления брикетов в зависимости от температуры*

Температура, °С	Состав газа, об. %									
	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	SO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	NO	NO <sub>2</sub>	Ar	H <sub>2</sub> O
500	75,24	0,17	17,42	0,00	0,07	0,14	1·10 <sup>-5</sup>	0,00	0,90	6,05
600	75,21	0,21	17,41	0,00	0,15	0,06	7·10 <sup>-5</sup>	0,00	0,90	6,05
700	75,19	0,23	17,41	0,00	0,19	0,02	2,3·10 <sup>-4</sup>	0,00	0,90	6,05
800	75,19	0,23	17,41	0,00	0,20	0,01	8·10 <sup>-4</sup>	0,00	0,90	6,05
900	75,19	0,24	17,40	0,00	0,21	3·10 <sup>-3</sup>	2·10 <sup>-3</sup>	0,00	0,90	6,05
1000	75,18	0,24	17,40	3·10 <sup>-5</sup>	0,21	1·10 <sup>-3</sup>	3·10 <sup>-3</sup>	0,00	0,90	6,05
1100	75,18	0,24	17,40	2·10 <sup>-4</sup>	0,21	6·10 <sup>-4</sup>	7·10 <sup>-3</sup>	1·10 <sup>-5</sup>	0,90	6,05
1200	75,18	0,24	17,40	1·10 <sup>-3</sup>	0,21	3·10 <sup>-4</sup>	0,01	1·10 <sup>-5</sup>	0,90	6,05

В продуктах сгорания сера присутствует преимущественно в виде диоксида (SO<sub>2</sub>) и триоксида (SO<sub>3</sub>). При низких температурах в составе продуктов горения преобладает SO<sub>3</sub>, доля SO<sub>2</sub> гораздо ниже. Это объясняется термодинамической стабильностью SO<sub>3</sub> в экзотермической реакции  $SO_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightleftharpoons SO_3$  при пониженных температурах. При температурах выше 800 °С равновесие смещается в сторону образования SO<sub>2</sub>. В интервале 500-700 °С концентрация NO минимальна, что характерно для «топливных» оксидов азота, образующихся из азота, связанного в топливе. При повышении температуры от 800 до 1200 °С концентрация NO возрастает более чем на порядок – с 0,01 до 0,16 г/м<sup>3</sup>. Данный экспоненциальный рост свидетельствует о начале доминирования термического механизма (механизм Зельдовича), где скорость образования NO резко увеличивается с температурой за счет окисления атмосферного азота. Исследование выполнено при поддержке гранта в рамках конкурса «Наука-2030».

## Содержание

<b>Смирнова Н.В.</b> Фото-, электро- и фотоэлектрокаталитически активные материалы: электрохимический синтез и приложения	5
<b>Золотухина Е.В., Горьков К.В., Левченко М.Г.</b> Новые представления о механизме токообразующей реакции на биоанодах микробных топливных элементов	6
<b>Герасимова Е.В., Клейникова С.А., Горьков К.В., Левченко М.Г., Золотухина Е.В.</b> Особенности механизма медиаторного биоэлектрокатализа с нерастворимым редокс-медиатором и дизайна биоанода	7
<b>Алексеенко А.А., Беленов С.В., Павлец А.С., Баян Ю.А., Панкова Ю.А., Астравух Я.В., Алексеенко Д.В., Гутерман В.Е.</b> Создание электрокатализаторов для водородной энергетики	8
<b>Пуха В.Е., Нечаев Г.В., Лысков Н.В.</b> Вакуумные технологии функциональных слоев для твердооксидных топливных элементов	9
<b>Бескопыльный Е.Р., Мауэр Д.К., Меньщиков В.С., Алексенко Д.В., Беленов С.В.</b> Тестирование катализаторов серии Pt в составе мембранно-электродных блоков	10
<b>Яльмаев А.Б., Новиков Д.В., Левченко А.В.</b> Двухслойные анодные каталитические электроды с добавлением диоксида кремния	11
<b>Клименов И.А., Бельмесов А.А., Шмыглева Л.В., Герасимова Е.В., Галин М.З., Левченко А.В.</b> Роль анодной добавки диоксида кремния в оптимизации характеристик низкотемпературных топливных элементов	12
<b>Скляр В.М., Грицай М.А., Солдатов М.А.</b> Направленный дизайн одноатомных Fe-N-C катализаторов посредством альтернативных методов сборки прекурсоров	13
<b>Гаврилова А.А., Невельская А.К., Мауэр Д.К., Коханов А.А., Беленов С.В.</b> Разработка электрокатализаторов для низкотемпературных топливных элементов на основе наночастиц высокоэнтропийного сплава	14
<b>Бельмесов А.А., Галин М.З., Герасимова Е.В., Шмыглева Л.В., Левченко А.В.</b> Влияние частоты включения-выключения батарей топливных элементов с открытым катодом на их деградацию	15
<b>Белинский Е.В., Беличенко М.А., Фаддеев Н.А.</b> Влияние структуры каналов биполярных пластин на тепло- и массоперенос в твердополимерном топливном элементе	16
<b>Алексеенко Д.В., Павлец А.С., Гутерман В.Е., Алексеенко А.А., Беленов С.В.</b> Производство линейки катализаторов для низкотемпературных топливных элементов	17
<b>Пинаева Е.А., Галин М.З., Бельмесов А.А., Шмыглева Л.В., Левченко А.В.</b> Влияние катодного ГДС на мощностные характеристики топливного элемента с открытым катодом	18
<b>Канцыпа И.В., Паперж К.О., Гутерман В.Е.</b> Новый подход к синтезу электрокатализаторов на основе платины и палладия для катода топливных элементов с протонообменной мембраной	19
<b>Губанова А.А., Куриганова А.Б., Леонтьев И.Н.</b> Окислительно-восстановительные процессы на Pd-содержащих материалах в присутствии H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	20
<b>Фаддеев Н.А., Беличенко М.А. Бондарев Н.Д.</b> Импульсная активации мембранно-электродного блока низкотемпературного топливного элемента	21
<b>Шмыглева Л.В., Цебрук И.С., Берестенко В.И., Колмаков В.Г., Яльмаев А.Б., Бельмесов А.А.</b> Плазмохимический синтез порошковых материалов для электрохимических устройств	22
<b>Коханов А.А., Невельская А.К., Беленов С.В.</b> Высокотемпературный синтез PtPdCo/C катализаторов для низкотемпературных топливных элементов	23

<b>Солдатов М. А., Скляр В.М., Грицай М.А.</b> Спектроскопия рентгеновского поглощения для определения динамики локальной атомной и электронной структуры катализаторов	24
<b>Галин М.З., Бельмесов А.А., Шмыглева Л.В., Герасимова Е.В., Левченко А.В.</b> Аспекты эксплуатации батареи водород-воздушных топливных элементов с открытым катодом	25
<b>Худолей А.В., Паперж К.О., Гутерман В.Е.</b> Новый подход к получению анодных PtRu/C катализаторов с высокой активностью в реакции окисления метанола	26
<b>Беличенко Т.А., Ульяновкина А.А.</b> Размерные эффекты в фотоэлектрохимии и фотокатализе	27
<b>Рожков Я. Д., Катария Я. В., Смирнова Н. В.</b> Применение искусственного интеллекта для дизайна катализаторов процесса электровосстановления кислорода	28
<b>Грицай М. А., Скляр В.М., Солдатов М.А.</b> Разработка operando ячейки для исследования каталитической активности катализаторов	29
<b>Беличенко М.А., Фаддеев Н.А.</b> Аддитивные технологии для производства композитных биполярных пластин	30
<b>Мещерякова Е. Е., Чиркова Е.А., Кудрина В.Ю., Фалина И.В., Кононенко Н.А.</b> Транспортные характеристики гибридных мембран для водородного топливного элемента	31
<b>Бескопыльный Е.Р., Гаврилова А.А., Мауэр Д.К., Кожокар Е.Л., Алексеенко А.А.</b> Влияние различных типов обработки на электропроводность российских протонообменных мембран	32
<b>Каюмов Р.Р., Глухов А.А., Лапшин А.Н., Лочина А.А., Шмыглева Л.В.</b> Литий- и натрий-проводящие нафион-подобные мембраны для химических источников энергии	33
<b>Осташевская К.С., Корчевная А.И., Шкирская С.А.</b> Исследование селективности гетерогенных катионо- и анионообменных мембран с различным содержанием доли ионообменной смолы	34
<b>Бровкина М.А., Фалина И.В., Лоза Н.В.</b> Исследование процесса отравления анионообменной мембраны компонентами яблочного сока методом хронопотенциометрии	35
<b>Криводубский Д.П., Баян Ю.А., Герасимов Е.Ю., Алексеенко А.А.</b> Электрохимические и структурно-морфологические свойства Pt/C электрокатализаторов: роль соотношения (углерод : меламина) при модифицировании углеродного носителя	36
<b>Ставенчук Э.А, Алексеенко Е.А., Куриганова А.Б.</b> Исследование Ag-содержащих композитов, полученных в условиях импульсного электролиза в составе суперконденсаторов	37
<b>Кубанова М. С., Юрьева Т.М., Андреева В.Е., Куриганова А.Б., Смирнова Н.В.</b> Влияние состава электролита на электрохимическое поведение алюминия в условиях импульсного электролиза	38
<b>Колмаков В.Г., Евщик Е.Ю., Шиховцева А.В., Левченко А.В.</b> Литий-ионные аккумуляторы для микроспутников на низкой околоземной орбите	39
<b>Зубков И.Н., Клушин В.А., Васьковский А.В., Салиев А.Н., Папета О.П.</b> Термодинамическая оценка образования вредных выбросов при сжигании углеродного брикета на основе пиролизной сажи в контексте низкоуглеродных технологий	40





## Водородная маевка-2026

### Мезмайская школа

#### На мотив песни «Чему учат в школе»

28.04.2025 г.

Автор слов Екатерина Викторовна Золотухина  
Композитор Михаил Спартакович Пляцковский

Нас доклады составлять и работу обсуждать  
учат в Школе, учат в Школе, учат в Школе.  
Как поверхность углубить и мембраны приручить  
учат в Школе, учат в Школе, учат в Школе.

Как ячейки собирать, как в рентгене понимать  
учат в Школе, учат в Школе, учат в Школе.  
Игры разные любить, труд научный оценить  
учат в Школе, учат в Школе, учат в Школе.

Вольтамперки как снимать, как кристаллы изучать  
учат в Школе, учат в Школе, учат в Школе.  
Как уху иль плов сварить, как науке послужить  
учат в Школе, учат в Школе, учат в Школе.

Про Комсол и про масла и как выжить в холода  
учат в Школе, учат в Школе, учат в Школе.  
QR коды применять и друзей приобретать  
учат в Школе, учат в Школе, учат в Школе!





*Научное издание*

---

**Тезисы докладов  
VIII Научно-практической конференции  
«Водородная маевка»  
26 - 30 апреля 2026 года,  
п. Мезмай, Россия**

**Издаётся в авторской редакции**

Подписано в печать 15.04. 2026 г.  
Формат 60\*84 1/16. Бумага офсетная.  
Усл. печ. л. 2,9. Уч. изд. л. 2,; .  
Тираж 50 экз. Заказ № 47-394.

Издательство Лик  
346430, г. Новочеркасск, пр. Платовский 82 Е  
тел: 8(8635)226-442, 8-952-603-0-609

Отпечатано  
в Издательско-полиграфическом комплексе «Колорит»  
346430, г. Новочеркасск, пр. Платовский 82 Е  
тел: 8(8635)226-442, 8-918-518-04-29, center-op@mail.ru